

Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

TESI DI LAUREA

**Effetti delle opere fisse del Mo.S.E. sull'idrodinamica
dei rii interni alla città di Venezia**

**Effects of the Mo.S.E. project on the hydrodynamics
of the city of Venice canals**

Relatore:

Ch.mo Prof. Luca Carniello

Correlatori:

Dott. Ing. Bruno Matticchio

Dott. Ing. Devis Canesso

Dott. Ing. Daniele Viero

Laureando:

Daniele Pinton

matr. 1130729

Anno Accademico 2017/2018

"Nel coltivare sé stessi, non esiste la parola «fine». Chi si ritiene completo, in realtà, ha voltato le spalle alla Via."

Yamamoto Tsunetomo

"Nelle azioni di tutti gli uomini, e massime de' Principi, dove non è giudizio a chi reclamare, si guarda al fine. Facci adunque un Principe conto di vivere e mantenere lo Stato; i mezzi saranno sempre giudicati onorevoli, e da ciascuno lodati."

Niccolò Machiavelli

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Professor Luca Carniello per la disponibilità e la pazienza dimostrate nei miei confronti, e per la fiducia in me riposta nell'affidarmi questo argomento di tesi.

Ringrazio inoltre l'Ing. Daniele Viero per la preziosa collaborazione in campo numerico, e lo staff di Ipros S.r.l., in particolare gli Ing.i Bruno Matticchio, Paolo Peretti e Devis Canesso per il materiale, le informazioni e le delucidazioni fornite.

Particolari ringraziamenti vanno a Davide Verzotto, per la gentile concessione di un server utile allo svolgimento delle simulazioni numeriche, e a Riccardo Pinton per aver racchiuso la mia intera personalità nell'aforisma in prima pagina riportato.

Ringrazio infine la mia Famiglia: mia mamma Marisa, mio papà Danilo e mio fratello Simone, per avermi sostenuto non solo economicamente durante il mio percorso di studi.

Indice

Introduzione	1
1 La laguna e la marea	3
1.1 L'ambiente lagunare	3
1.2 Le lagune dell'Alto Adriatico	4
1.3 La laguna di Venezia	5
1.3.1 Le intestadure e la diversione dei fiumi	6
1.3.2 La costruzione dei moli alle bocche di porto	12
1.3.3 Lo scavo dei grandi canali navigabili	16
1.3.4 Le nuove opere alle bocche di porto	18
1.4 Il fenomeno della marea	19
1.4.1 Previsione e calcolo della marea in Laguna	22
1.4.2 Acque alte ed eventi eccezionali	24
2 Il Modello Numerico	25
2.1 Il modello	25
2.2 Modello 2D	26
2.2.1 Equazioni	26
2.2.2 Parametri	28
2.2.3 Media in fase	29
2.2.4 Effetti del vento	31
2.2.5 Osservazioni	31
2.3 Modello 1D	32
2.3.1 Equazioni	32
2.3.2 Osservazioni	33
2.4 La laguna	35

2.4.1	Limiti del dominio	35
2.4.2	Caratteristiche del reticolo di calcolo	38
2.4.2.1	Schematizzazione delle bocche di porto	40
2.5	La rete dei canali di Venezia	47
2.5.1	Modello della rete	47
3	Metodi e strumenti	51
3.1	Misure di Livello	51
3.1.1	La rete Meteo-Mareografica	51
3.1.2	Le stazioni di misura	52
3.1.3	Le stazioni di riferimento	52
3.2	Misure di velocità	55
3.2.1	Strumenti	55
3.2.2	I canali di riferimento	56
3.2.3	Dati di velocità	57
3.3	Metodi di Taratura	58
3.3.1	Determinazione delle scabrezze alle bocche di porto	59
3.3.2	Metodo	61
3.3.3	Scabrezza dei rii	62
3.4	Metodi di Verifica	64
3.4.1	Nash-Sutcliffe Model Efficiency (ME)	64
3.4.2	Percentage Model Bias (PB)	65
4	Periodi considerati e Condizioni al Contorno	67
4.1	Descrizione dei periodi	67
4.1.1	Periodo Verifica modello Ante Mo.S.E.	68
4.1.2	Periodo Taratura - Verifica modello Post Mo.S.E.	71
4.1.3	Periodo rilievi San Polo - Santa Croce	74
4.1.4	Periodo rilievi Dorsoduro	77
4.1.5	Periodo rilievi Cannaregio	80
4.1.6	Periodo rilievi Castello	83
5	Taratura e verifica dei modelli numerici	87
5.1	Introduzione	87
5.2	Verifica Livelli alle Bocche di Porto	89
5.3	Taratura della scabrezza alle bocche di porto	92

5.3.1	Effetti dovuti alle opere	92
5.3.2	Calibrazione di K_S	94
5.4	Verifica sui livelli	100
5.4.1	Risultati Modello Ante Mo.S.E.	101
5.4.2	Risultati Modello Post Mo.S.E.	103
5.5	Analisi di sensibilità sulle scabrezze dei rii	105
5.5.1	Scabrezza uniforme - Risultati Canali S. Polo - S. Croce	107
5.5.2	Risultati Canali Dorsoduro	111
5.5.3	Risultati Canali Cannaregio	115
5.5.4	Risultati Canali Castello	119
5.5.5	Distribuzione non uniforme della scabrezza	123
5.5.6	Considerazioni	126
6	Effetti del vento sulla modellazione numerica	127
6.1	Effetti del vento sui livelli	128
6.1.1	Periodo rilievi San Polo - Santa Croce	129
6.1.2	Periodo rilievi Dorsoduro	131
6.1.3	Periodo rilievi Cannaregio	133
6.1.4	Periodo rilievi Castello	135
6.2	Effetti del vento sulle velocità	137
6.2.1	Periodo rilievi San Polo - Santa Croce	138
6.2.2	Periodo rilievi Dorsoduro	141
6.2.3	Periodo rilievi Cannaregio	144
6.2.4	Periodo rilievi Castello	147
6.3	Considerazioni	150
7	Effetti del Mo.S.E. in prossimità delle bocche di porto	151
7.1	Variazione delle portate	152
7.2	Variazione delle velocità	154
7.2.1	Effetti sul bacino della laguna	154
7.2.2	Bocca di Lido	156
7.2.3	Bocca di Malamocco	157
7.2.4	Bocca di Chioggia	158
7.3	Considerazioni	159

8	Effetti del Mo.S.E. sulla laguna e sulla città di Venezia	161
8.1	Introduzione	161
8.2	Analisi dei livelli	162
8.2.1	Effetti sulla propagazione dei livelli	163
8.3	Analisi delle velocità nei rii di Venezia	166
8.3.1	Periodo rilievi San Polo - Santa Croce	167
8.3.2	Periodo rilievi Dorsoduro	169
8.3.3	Periodo rilievi Cannaregio	171
8.3.4	Periodo rilievi Castello	173
8.4	Analisi dell'intera rete	175
8.4.1	Sestriere Cannaregio	177
8.4.2	Sestriere Castello	179
8.4.3	Sestriere Santa Croce	181
8.4.4	Sestriere San Polo	183
8.4.5	Sestriere San Marco	185
8.4.6	Sestriere Dorsoduro	187
8.4.7	Considerazioni	189
8.4.8	Intersezione Canal Grande - Canale di Cannaregio	192
8.5	Modifica dei partiacque	194
8.5.1	Periodo rilievi San Polo - Santa Croce	195
8.5.2	Periodo rilievi Dorsoduro	196
8.5.3	Periodo rilievi Cannaregio	197
8.5.4	Periodo rilievi Castello	198
8.5.5	Traslazione media della fascia partiacque	199
8.5.6	Considerazioni	200
	Bibliografia	207

Elenco delle figure

1.1	L'oppori degli elementi terrestri e marini è la base della genesi dell'ambiente lagunare. (Tratto da "Della laguna di Venezia" di Bernardo Trevisan (1652-1720))	4
1.2	Inquadramento geografico della Laguna di Venezia (destra) nel territorio italiano (sinistra)	5
1.3	Posizione dell'argine di intestadura e del traversagno secondo una mappa di Cristoforo Sabbadino del 1547, eseguita per ordine della magistratura sopra alle acque. (Tratta da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010)	7
1.4	Le deviazioni e le nuove inalveazioni del Brenta realizzate dopo gli interventi di intestadura attuati nel corso del XIV secolo per difendere la laguna dagli interrimenti, riportate nella carta di Pietro Marcon (1878). (Tratta da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010)	9
1.5	Gli interventi di contenimento e le deviazioni del Piave e del Sile operate dai veneziani a difesa della laguna, riportati nella carta di Pietro Marcon del 1878. (Tratta da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010)	11
1.6	Barra di foce a Lido (sinistra) e Malamocco (destra)	12
1.7	Configurazione e batimetria delle bocche di porto prima e dopo la costruzione dei nuovi moli. a) Lido 1882; b) Lido 1892; c) Malamocco 1835; d) Malamocco 1900; e) Chioggia 1811 ; f) Chioggia 1935. (Tratte da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010)	15

1.8	Il tracciato del canale navigabile di S. Spirito, realizzato nel 1726 per collegare il porto di Malamocco a Venezia, evidenziato sulla carta di Angelo Emo (1763) (Tratta da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010)	16
1.9	Il tracciato del canale navigabile Vittorio Emanuele III costruito (1920-1925) per collegare la I Zona Industriale di Porto Marghera direttamente al mare (Tratta da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010)	17
1.10	Il tracciato del canale Malamocco-Marghera costruito tra gli anni 1964 e 1968 per collegare direttamente la bocca di Malamocco con la Zona Industriale di Porto Marghera. (Tratta da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010) .	18
1.11	Forze agenti nella generazione della marea astronomica: attrazione gravitazionale (rosso), forza centrifuga (blu) e risultante (nero)	20
1.12	Comportamento della marea astronomica in relazione al diverso allineamento tra i corpi celesti	21
1.13	Livello delle onde e delle maree a Venezia (PDS): 2-6 novembre 1966	24
2.1	Descrizione dei parametri φ , ϑ e η	29
2.2	Comportamento delle funzioni φ , η e Y	30
2.3	Schemi di calcolo dell'elemento monodimensionale "canale" in relazione agli elementi bidimensionali "maglie"	34
2.4	Riduzione della dimensione del dominio esterno alle bocche di porto della laguna di Venezia allo scopo di ridurre il ritardo di propagazione dovuto all'impiego della condizione al contorno uniforme legata alla stazione di Piattaforma CNR. Le BC vengono spostate dal largo alla zona immediatamente prossima alle bocche.	37
2.5	Limiti e parti fondamentali del dominio di riferimento per la modellazione numerica	37

2.6	Griglia del modello uni-bidimensionale (a) adottato per la descrizione della laguna di Venezia, schematizzazione della batimetria (b) e della scabrezza al fondo (c). La distribuzione del parametro a_r non è stata riportata in quanto uniformemente posto pari a 0.30	39
2.7	Configurazione ante-Mo.S.E. della bocca di porto di Lido (2003) - distribuzione delle quote del fondo h_f [m s.l.m.m]	41
2.8	Configurazione post-Mo.S.E. della bocca di porto di Lido (2012) - distribuzione delle quote del fondo h_f [m s.l.m.m]	41
2.9	Configurazione ante-Mo.S.E. della bocca di porto di Malamocco (2003) - distribuzione delle quote del fondo h_f [m s.l.m.m]	43
2.10	Configurazione post-Mo.S.E. della bocca di porto di Malamocco (2012) - distribuzione delle quote del fondo h_f [m s.l.m.m]	43
2.11	Configurazione ante-Mo.S.E. della bocca di porto di Chioggia (2003) - distribuzione delle quote del fondo h_f [m s.l.m.m]	45
2.12	Configurazione post-Mo.S.E. della bocca di porto di Chioggia (2012) - distribuzione delle quote del fondo h_f [m s.l.m.m]	45
2.13	Restringimento delle bocche di porto della laguna di Venezia dovuta alla realizzazione del Mo.S.E. (foto aeree georeferenziate tratte dal GeoPortale Nazionale del Ministero dell' Ambiente http://www.pcn.minambiente.it/GN/).	46
2.14	Schema della rete 1D dei canali della città. Seppur i canali in rosso siano tombati nella realtà, non essendo nota la quota della sommità del canale, si è preferito considerare un funzionamento a pelo libero nello svolgimento delle simulazioni.	48
2.15	Distribuzione quote del fondo rete iniziale [m s.l.m.m.]	49
2.16	Distribuzione quote del fondo rete modificata [m s.l.m.m.]	49
3.1	Localizzazione e funzione delle stazioni meteo-mareografiche	54
3.2	Sezione schematica di una stazione mareografica con galleggiante e pozzetto di calma	54
3.3	Correntometro InterOcean modello S4	55
3.4	Localizzazione dei canali interessati dalle misure di velocità	57

3.5	Zone interessate dalla taratura del parametro di scabrezza K_S (contorno rosso): a) Lido; b) Malamocco; c) Chioggia . . .	60
3.6	Procedimenti iterativi per la taratura dei K_S alle bocche di porto. a) manuale; b) automatico con contatore	61
4.1	Condizioni al contorno imposte al largo	68
4.2	Intensità del vento misurate	69
4.3	Diagramma polare Intensità - Direzione	69
4.4	Condizioni al contorno imposte al largo	71
4.5	Intensità del vento misurate	72
4.6	Diagramma polare Intensità - Direzione	72
4.7	Condizioni al contorno imposte al largo	74
4.8	Intensità del vento misurate	75
4.9	Diagramma polare Intensità - Direzione	75
4.10	Condizioni al contorno imposte al largo	77
4.11	Intensità del vento misurate	78
4.12	Diagramma polare Intensità - Direzione	78
4.13	Condizioni al contorno imposte al largo	80
4.14	Intensità del vento misurate	81
4.15	Diagramma polare Intensità - Direzione	81
4.16	Condizioni al contorno imposte al largo	83
4.17	Intensità del vento misurate	84
4.18	Diagramma polare Intensità - Direzione	84
5.1	Confronto livelli - Periodo Ante Mo.S.E. - Lido Diga Sud . .	90
5.2	Confronto livelli - Periodo Ante Mo.S.E. - Malamocco Diga Nord	90
5.3	Confronto livelli - Periodo Ante Mo.S.E. - Chioggia Diga Sud	90
5.4	Confronto livelli - Periodo Post Mo.S.E. - Lido Diga Sud . . .	91
5.5	Confronto livelli - Periodo Post Mo.S.E. - Malamocco Diga Nord	91
5.6	Confronto livelli - Periodo Post Mo.S.E. - Chioggia Diga Sud	91
5.7	Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Grassabò .	97
5.8	Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Burano . .	97
5.9	Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Sant'Erasmus	97
5.10	Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di San Nicolò	98

5.11	Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Punta della Salute	98
5.12	Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Marghera	98
5.13	Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Faro Rocchetta	99
5.14	Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Valle Avertò	99
5.15	Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Chioggia Vigo	99
5.16	Diagramma di Taylor per le velocità: metodo di lettura dei risultati	106
5.17	Diagramma di Taylor per le velocità nei rii: Canali zona San Polo - Santa Croce. Sono indicati: $a = K_S 25$; $b = K_S 30$; $c = K_S 35$; $d = K_S 40$	108
5.18	San Polo, Santa Croce - Rio di San Zan Degolà Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete	109
5.19	San Polo, Santa Croce - Rio di Santa Maria Mater Domini Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete	110
5.20	San Polo, Santa Croce - Rio delle Becarie Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete	110
5.21	Vento misurato a Chioggia diga Sud nel periodo S.Polo - S.Croce	110
5.22	Diagramma di Taylor per le velocità nei rii: Canali zona Dorsoduro. Sono indicati: $a = K_S 25$; $b = K_S 30$; $c = K_S 35$; $d = K_S 40$	112
5.23	Dorsoduro - Rio dell'Arzere Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete	113
5.24	Dorsoduro - Rio del Tentor Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete	114
5.25	Dorsoduro - Rio di Santa Margherita Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete	114
5.26	Vento misurato a Chioggia diga Sud nel periodo Dorsoduro	114
5.27	Diagramma di Taylor per le velocità nei rii: Canali zona Cannaregio. Sono indicati: $a = K_S 25$; $b = K_S 30$; $c = K_S 35$; $d = K_S 40$	116

5.28	Cannaregio - Rio di San Giobbe Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete	117
5.29	Cannaregio - Rio della Misericordia Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete	118
5.30	Cannaregio - Rio di San Felice Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete	118
5.31	Vento misurato a Chioggia diga Sud nel periodo Cannaregio	118
5.32	Diagramma di Taylor per le velocità nei rii: Canali zona Castello. Sono indicati: $a = K_S 25$; $b = K_S 30$; $c = K_S 35$; $d = K_S 40$	120
5.33	Castello - Rio della Tana Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete	121
5.34	Castello - Rio di Sant'Isepo Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete	122
5.35	Castello - Rio dei Giardini Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete	122
5.36	Vento misurato a Chioggia diga Sud nel periodo Castello . .	122
5.37	Distribuzione delle zone a scabrezza omogenea	123
5.38	Diagramma di Taylor per le velocità: confronto ottimo - K_S variabile Sono indicati: $a = K_S 25$; $b = K_S 30$; $c = K_S 35$; $d = K_S 40$; $v = K_S$ variabile	124
5.39	Diagramma di Taylor per le velocità: confronto ottimo - K_S variabile Sono indicati: $a = K_S 25$; $b = K_S 30$; $c = K_S 35$; $d = K_S 40$; $v = K_S$ variabile	125
6.1	Stazioni di riferimento per la misura del vento	128
6.2	Confronto livelli ed errori a Burano in funzione del vento . .	130
6.3	Confronto livelli ed errori a Punta della Salute in funzione del vento	132
6.4	Confronto livelli ed errori a Punta della Salute in funzione del vento	134
6.5	Confronto livelli ed errori a Punta della Salute in funzione del vento	136
6.6	Localizzazione dei canali interessati dalle misure delle velocità	137

6.7	Diagramma di Taylor per le velocità: zona San Polo - Santa Croce. Sono indicati: a = no vento; b = vento Chioggia.	138
6.8	Confronto velocità calcolate-misurate: rio San Zan Degolà	140
6.9	Confronto velocità calcolate-misurate: rio S.M.M.D.	140
6.10	Confronto velocità calcolate-misurate: rio de le Becarie	140
6.11	Diagramma di Taylor per le velocità: Canali zona Dorsoduro. Sono indicati: a = no vento; b = vento Chioggia.	141
6.12	Confronto velocità calcolate-misurate: rio dell'Arzere	143
6.13	Confronto velocità calcolate-misurate: rio del Tentor	143
6.14	Confronto velocità calcolate-misurate: rio di Santa Margherita	143
6.15	Diagramma di Taylo per le velocità: Canali zona Cannaregio. Sono indicati: a = no vento; b = vento Chioggia.	144
6.16	Confronto velocità calcolate-misurate: rio di San Giobbe	146
6.17	Confronto velocità calcolate-misurate: rio della Misericordia	146
6.18	Confronto velocità calcolate-misurate: rio di San Felice	146
6.19	Diagramma di Taylor per le velocità: Canali zona Castello. Sono indicati: a = no vento; b = vento Chioggia.	147
6.20	Confronto velocità calcolate-misurate: rio della Tana	149
6.21	Confronto velocità calcolate-misurate: rio di Sant'Isepo	149
6.22	Confronto velocità calcolate-misurate: rio dei Giardini	149
7.1	Andamento delle portate scambiate attraverso la bocca di Lido (a), Malamocco (b) e Chioggia (c) con il mare per le configurazioni della laguna in assenza e con inserite le opere fisse previste dal Mo.S.E..	153
7.2	Distribuzione spaziale dei valori delle velocità nella laguna in fase di massimo flusso nelle sue configurazioni in presenza (a) e assenza (b) delle opere fisse previste dal Mo.S.E.	155
7.3	Distribuzione spaziale dei valori delle velocità nella laguna in fase di massimo riflusso nelle sue configurazioni in presenza (a) e assenza (b) delle opere fisse previste dal Mo.S.E.	155

7.4	Distribuzione istantanea delle velocità alla bocca di Lido nella fase di massimo flusso (sopra) e massimo riflusso (sotto) della marea di riferimento considerata, nelle configurazioni in presenza (destra) e assenza (sinistra) delle opere fisse previste dal Mo.S.E..	156
7.5	Distribuzione istantanea delle velocità alla bocca di Malamocco nella fase di massimo flusso (sopra) e massimo riflusso (sotto) della marea di riferimento considerata, nelle configurazioni in presenza (destra) e assenza (sinistra) delle opere fisse previste dal Mo.S.E..	157
7.6	Distribuzione istantanea delle velocità alla bocca di Chioggia nella fase di massimo flusso (sopra) e massimo riflusso (sotto) della marea di riferimento considerata, nelle configurazioni in presenza (destra) e assenza (sinistra) delle opere fisse previste dal Mo.S.E..	158
8.1	Confronto livelli Ante - Post Mo.S.E. - Stazione di San Nicolò	164
8.2	Confronto livelli Ante - Post Mo.S.E. - Stazione di Faro Rocchetta	164
8.3	Confronto livelli Ante - Post Mo.S.E. - Stazione di Chioggia Vigo	164
8.4	Livelli istantanei in fase di flusso. a) = Ante Mo.S.E.; b) = Post Mo.S.E. Rosso = -0.0875 m ; Verde = -0.100 m ; Arancione = -0.125 m	165
8.5	Livelli istantanei in fase di riflusso. a) = Ante Mo.S.E.; b) = Post Mo.S.E. Rosso = 0.300 m ; Verde = 0.320 m ; Arancione = 0.340 m	165
8.6	Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio di S. Zan Degolà	168
8.7	Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio di S. Maria Mater Domini . .	168
8.8	Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio de le Becarie	168
8.9	Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio dell'Arzere	170
8.10	Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio del Tentor	170
8.11	Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio di Santa Margherita	170
8.12	Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio di San Giobbe	172
8.13	Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio della Misericordia	172

8.14	Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio di San Felice	172
8.15	Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio de la Tana	174
8.16	Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio di Sant'Isepo	174
8.17	Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio dei Giardini	174
8.18	Tipi di variazioni incontrate nell'andamento delle velocità .	176
8.19	Suddivisione dei canali 1D e dei nodi nel sestriere Cannaregio	177
8.20	Classificazione canali 1D in funzione di ampiezza e ritardo .	178
8.21	Suddivisione dei canali 1D e dei nodi nel sestriere Castello .	179
8.22	Classificazione canali 1D in funzione di ampiezza e ritardo .	180
8.23	Suddivisione dei canali 1D e dei nodi nel sestriere Santa Croce	181
8.24	Classificazione canali 1D in funzione di ampiezza e ritardo .	182
8.25	Suddivisione dei canali 1D e dei nodi nel sestriere San Polo .	183
8.26	Classificazione canali 1D in funzione di ampiezza e ritardo .	184
8.27	Suddivisione dei canali 1D e dei nodi nel sestriere San Marco	185
8.28	Classificazione canali 1D in funzione di ampiezza e ritardo .	186
8.29	Suddivisione dei canali 1D e dei nodi nel sestriere Dorsoduro	187
8.30	Classificazione canali 1D in funzione di ampiezza e ritardo .	188
8.31	Confronto Velocità - Canale B7 Dorsoduro	190
8.32	Variazione del comportamento idrodinamico dell'intera rete dei canali di Venezia	191
8.33	Ubicazione del punto di incontro tra il Canal Grande e il Canale di Cannaregio	192
8.34	Misure correntometriche all'intersezione tra il Canal Grande e il Canale di Cannaregio effettuata il 26/11/2011 durante una marea crescente (tra le 8.57 e le 9.06). Nelle tre sezioni le misure non sono simultanee per cui la continuità non è rigorosamente rispettata (dati forniti dall'Ing. P. Peretti). . .	193
8.35	Spostamento della <i>linea del partiacque</i> tra le configurazioni Ante e Post Mo.S.E.. (a): fase di flusso; (b): fase di riflusso. .	195
8.36	Spostamento della <i>linea del partiacque</i> tra le configurazioni Ante e Post Mo.S.E.. (a): fase di flusso; (b): fase di riflusso. .	196
8.37	Spostamento della <i>linea del partiacque</i> tra le configurazioni Ante e Post Mo.S.E.. (a): fase di flusso; (b): fase di riflusso. .	197
8.38	Spostamento della <i>linea del partiacque</i> tra le configurazioni Ante e Post Mo.S.E.. (a): fase di flusso; (b): fase di riflusso. .	198

8.39	Spostamento medio della <i>fascia del partiacque</i> tra le configurazioni Ante e Post Mo.S.E., ottenuta come involuppo delle fasce ottenute per i vari periodi di studio.	199
------	--	-----

Introduzione

La laguna di Venezia, con i suoi 550 km^2 di superficie, si presenta come la più vasta zona lagunare del Mediterraneo, nota oltre che per la sua estensione anche per il suo inestimabile patrimonio storico, socio-economico, culturale ed ambientale.

La sua collocazione in prossimità dei tratti terminali dei grandi fiumi dell'Italia Settentrionale sta alla base del suo processo evolutivo. Il continuo deposito del materiale solido trasportato dai fiumi sfocianti all'interno del suo bacino, quali Brenta, Bacchiglione, Sile e Dese, abbinato al progressivo trasposto da parte delle correnti costiere dei sedimenti rilasciati a Nord dai fiumi Piave e Tagliamento e a Sud dai fiumi Adige e Po, hanno portato nel lungo periodo alla formazione dei cordoni litorali, ancora oggi posti a separazione dell'ambiente lagunare da quello marino, seppur modificati nella forma e nel numero.

Come riportato al Capitolo 1, nel corso dei secoli la laguna di Venezia è stata teatro di profonde trasformazioni, dovute soprattutto ad interessanti interventi antropici, che ne hanno modificato radicalmente il comportamento idrodinamico e di conseguenza il suo assetto morfologico, fino al raggiungimento della sua configurazione attuale, sempre più lontana dal rappresentare il punto di transizione tra l'entroterra e l'ambiente marino.

Tali variazioni, unite al continuo mutamento del clima globale e alla naturale tendenza dell'alto Adriatico ad essere interessato da forti escursioni di marea, soprattutto in presenza di specifiche condizioni meteorologiche di vento e pressione, hanno portato alla ricerca di soluzioni definitive per la protezione della città di Venezia e della laguna in generale, dagli effetti delle cosiddette "acque alte".

Le recenti opere alle bocche di porto, facenti parte del tanto noto quanto

discusso progetto Mo.S.E., dovrebbero costituire questa "soluzione definitiva".

La loro ultimazione sembra essere la causa delle più recenti alterazioni dell'idrodinamica interna alla laguna, e in particolare dei deflussi nella rete dei canali della città di Venezia tanto che, come è stato evidenziato da diverse fonti, tra cui le "cronache" di diversi abitanti della stessa città, primi tra tutti i gondolieri, quali diretti utilizzatori di queste caratteristiche vie d'acqua, sembra aver subito modifiche di entità tale da essere osservabili anche in assenza di appositi strumenti.

L'attenta analisi di tali mutamenti e lo studio delle modalità, frequenze e cause con cui questi si manifestano sono alla base del presente lavoro di tesi.

Tale valutazione è resa possibile tramite l'impiego di un modello numerico agli Elementi Finiti basato sulla schematizzazione uni-bidimensionale della laguna nelle due configurazioni antecedente e successiva all'ultimazione dei lavori del Mo.S.E. alle bocche di porto, le cui caratteristiche peculiari in termini di funzionamento e geometria sono riportate al Capitolo 2.

A seguito della valutazione sulla disponibilità dei dati di livello in laguna e di velocità nei rii, e della loro modalità di acquisizione nei diversi periodi di studio, riportati rispettivamente al Capitolo 3 e al Capitolo 4, l'affidabilità dei dati calcolati dal modello viene valutata tramite sua taratura e successiva verifica, riportate al Capitolo 5, anche in relazione agli effetti ottenuti dall'introduzione del vento nelle equazioni risolutive, come descritto al Capitolo 6.

Viene infine riportata l'analisi degli effetti dovuti all'ultimazione delle opere fisse del Mo.S.E..

Al Capitolo 7 viene descritto l'effetto delle modifiche alle bocche nei confronti delle zone ad esse più prossime, concentrando l'attenzione sulla variazione delle portate scambiate tra la laguna e il mare aperto, e sull'alterazione delle velocità dei flussi interni alle bocche e nelle zone limitrofe.

Al Capitolo 8 lo studio viene incentrato su tre fondamentali aspetti dell'idrodinamica lagunare: la propagazione dei livelli all'interno della laguna, la formazione delle fasce di partiacque a divisione dei vari sottobacini alimentati dalle bocche di porto e i flussi interni alla rete dei canali della città di Venezia.

Capitolo 1

La laguna e la marea

1.1 L'ambiente lagunare

Per laguna si intende un bacino acqueo costiero, poco profondo e con acque salate, nel quale emergono spesso formazioni insulari: si forma nelle regioni di deltazione dei grandi fiumi o negli arcipelaghi costieri con bassi fondali, ed è separato dal mare da un cordone litorale interrotto da bocche d'accesso.

Il processo di formazione degli ambienti lagunari è dovuto all'interazione tra due elementi fondamentali:

- **I processi continentali:** il trasporto di materiale solido da parte dei fiumi sfocianti nella superficie lagunare, in particolare sabbie, limi e argille, aventi granulometria contenuta;
- **I processi marini:** le correnti marine e gli eventi di marea.

Possono distinguersi due fondamentali tipi di lagune:

- **Lagune vive:** comunicano con il mare attraverso delle bocche di porto sempre aperte che garantiscono il continuo ricambio d'acqua grazie ai flussi generati dalle maree;
- **Lagune morte:** non direttamente comunicanti con il mare. Il ricambio d'acqua salmastra avviene qualora l'entità della marea permetta il sormonto dei cordoni litoranei posti al confine con il mare aperto.



Figura 1.1: L'opporsi degli elementi terrestri e marini è la base della genesi dell'ambiente lagunare. (Tratto da "Della laguna di Venezia" di Bernardo Trevisan (1652-1720))

1.2 Le lagune dell'Alto Adriatico

La genesi delle lagune presenti nell'Alto Adriatico, in comune accordo con diversi autori (Scortegagna, 2008; D'Alpaos, 2010), è da ricercare nell'interazione nelle zone costiere basse e ricche di foci fluviali, tra il continuo apporto di materiale sedimentario dei fiumi e i processi di sommersione da parte delle acque marine. In queste condizioni il susseguirsi degli allagamenti nelle fasi di flusso della marea e il successivo abbandono delle acque nelle fasi di riflusso, favorisce la nascita di una rete di canali, che sta alla base dell'ambiente lagunare.

1.3 La laguna di Venezia

La laguna di Venezia è la più ampia laguna del Mediterraneo con una superficie di circa 550 km^2 , dei quali circa 130 km^2 sono costituiti da isole e terre emerse e i restanti 420 km^2 da specchi d'acqua.

Essa è posta nella parte settentrionale del mare Adriatico, al quale è collegata mediante tre bocche di porto (Lido, Malamocco e Chioggia), ed è caratterizzata da profondità decisamente ridotte (mediamente di circa 1 m se si escludono i canali) e da una morfologia molto articolata.

Nel corso degli ultimi secoli è stata interessata dagli stessi *eventi di origine naturale* che hanno contribuito a plasmare la sua forma, a cui si sono sovrapposti una serie di *interventi antropici*, quali la diversione di fiumi, la modifica delle bocche di porto e l'escavazione di grandi canali per l'agevolazione della navigazione, che hanno portato alla sua configurazione attuale.

La nostra attenzione si focalizzerà soprattutto su questi ultimi interventi e in particolare sui loro effetti dal punto di vista idrodinamico, tralasciando volutamente l'intero processo di genesi della Laguna.

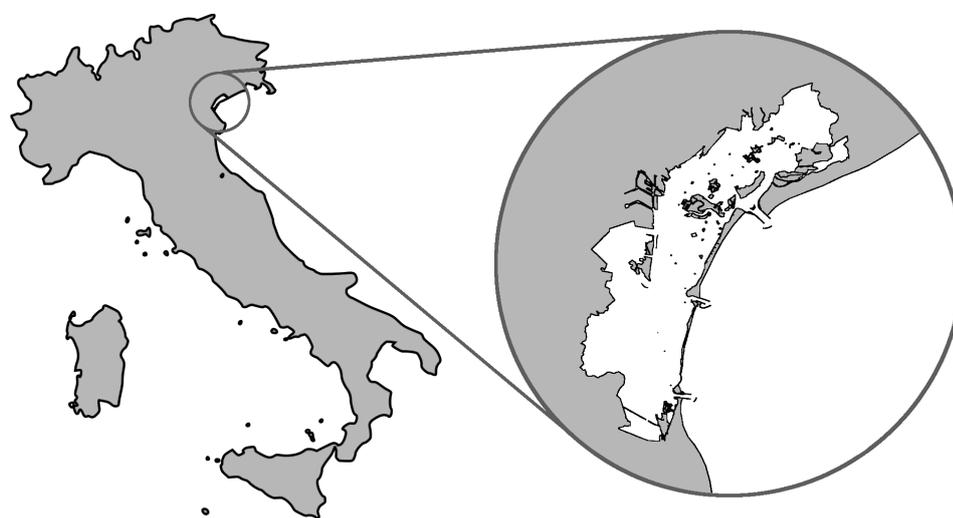


Figura 1.2: Inquadramento geografico della Laguna di Venezia (destra) nel territorio italiano (sinistra)

1.3.1 Le intestadure e la diversione dei fiumi

Nel periodo immediatamente successivo alla nascita dei primi insediamenti costituenti il nucleo della futura città di Venezia, la laguna iniziava a subire i primi interventi da parte dell'uomo, che si sovrapponevano inevitabilmente ai fenomeni di modificazione naturali indotti dalle maree, dal moto ondoso e dagli effetti dei fiumi.

Tali interventi di natura modesta erano per lo più indirizzati verso piccole superfici e canali minori: le prime venivano bonificate, i secondi raddrizzati o approfonditi allo scopo di garantire l'attività commerciale e dunque il sostentamento economico della città.

La presenza di numerosi fiumi sfocianti in laguna comprometteva seriamente la sopravvivenza della stessa, a causa dei fenomeni di interrimento che progressivamente interessavano le zone limitrofe alle loro foci, dovuti al costante apporto di materiale solido da parte della corrente. Le opere di contenimento degli stessi, costruite dalle popolazioni dell'entroterra, contribuivano ad incrementare l'entità di questo processo.

In particolare i maggiori effetti introdotti dai fiumi erano:

- Il progressivo interrimento della laguna prossima a Venezia a causa dello scarico delle torbide del *Brenta* in località Fusina, dove la foce si era spostata a seguito delle nuove inalveazioni realizzate dai padovani per mitigare i problemi idraulici nel proprio territorio;
- Il progressivo interrimento della zona nord della laguna a causa dello scarico delle acque del *Sile* in prossimità di Burano e Torcello e delle piene del *Piave* nella parte sommitale;
- L'interrimento con conseguente occlusione delle bocche di San Nicolò, Sant'Erasmus e Treporti a causa del deposito dei sedimenti rilasciati in mare dal Piave, la cui rimozione era impossibile viste le deboli velocità che si venivano a formare nelle piccole bocche interessate.

Tutto ciò danneggiava irreparabilmente la città di Venezia, intaccando inevitabilmente i suoi interessi economici. Tali problematiche portarono all'introduzione del concetto di "*gran laguna fa gran porto*", che sarebbe stato alla base dei successivi interventi svolti sul bacino lagunare.

Le intestadure

Le opere di intestadura consistono in argini posti al limite tra laguna e terraferma, con direzione sub-parallela a questa e a cui alcuni tratti sono intestati (da cui il nome "intestadure" in Veneziano).

I principali interventi furono:

- 1330 - 1391: Realizzazione dell'*argine di intestadura* allo scopo di allontanare le acque scaricate dal Brenta nel bacino di San Marco. Le portate raccolte dal Brenta di Fusina vennero dapprima scaricate all'altezza dell'isola di San Marco di Boccalama. L'argine fu successivamente esteso verso Nord per raccogliere le acque dei fiumi Botenigo e Maerne e verso Sud, permettendo lo scarico all'altezza della bocca di Malamocco;
- 1452: Realizzazione dell'*argine partidor* o *traversagno* come prosecuzione in laguna dell'argine di intestadura, per separare i bacini di Malamocco e S. Marco, evitando l'interscambio dei sedimenti del Brenta.

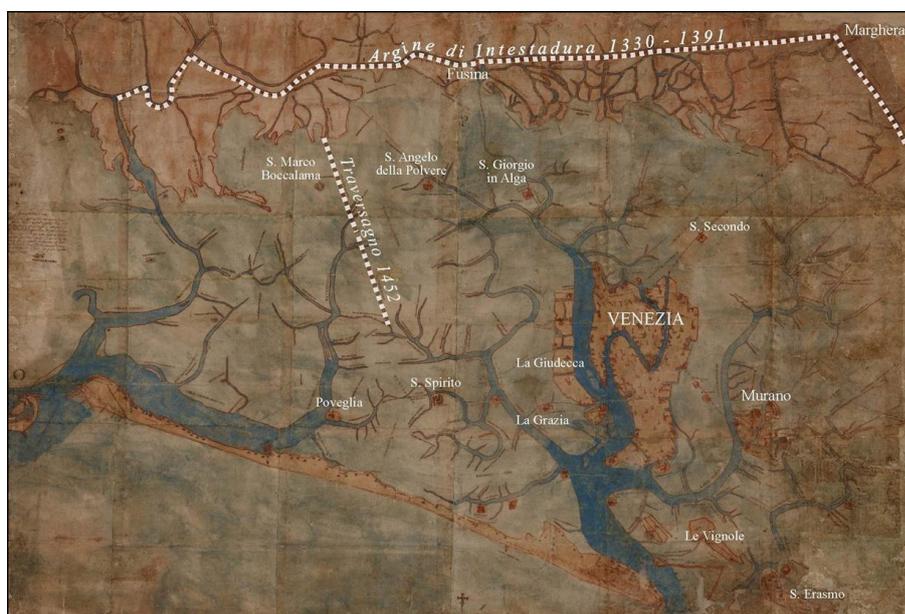


Figura 1.3: Posizione dell'argine di intestadura e del traversagno secondo una mappa di Cristoforo Sabbadino del 1547, eseguita per ordine della magistratura sopra alle acque. (Tratta da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010)

Diversione dei fiumi

L'inefficacia delle opere di intestadura portò alla ricerca di nuovi provvedimenti da attuare per una corretta salvaguardia dell'ambiente lagunare. La concomitante nascita della *magistratura sopra le acque* contribuì ad incrementare tale ricerca, che si concretizzò a partire dai primi anni del 1500 (seppur iniziò formalmente con un provvedimento del 1488 e materialmente con alcune opere precedenti) nelle grandi opere di diversione dei corsi d'acqua, possibili grazie alla conquista della vicina Padova e dei relativi territori da parte della Serenissima nel 1404.

Interventi Laguna Sud

Fiumi principali: *Brenta, Bacchiglione*.

- 1452: Creazione di tre diversivi in destra Brenta all'altezza di Oriago, allo scopo di allontanare le acque dal Bacino di San Marco, non pregiudicando però la navigazione da e verso Padova;
 - 1457: Creazione di un diversivo tra S. Bruson di Dolo e Conche, con conseguente intercettazione di altri corsi d'acqua tra i quali il Bacchiglione, portati a sfociare assieme al Brenta nel bacino di Chioggia;
 - 1502 - 1507: Definitivo spostamento della foce del Brenta da Fusina a Conche;
 - 1507: Deviazione dell'argine di intestadura a Nord allo scopo di incanalare le acque dei fiumi minori sfocianti in laguna con la costruzione del *canale dell'Osellino*;
 - 1540: Estromissione della foce del Brenta e del Bacchiglione dalla laguna. Entrambi i fiumi furono portati a sfociare su alvei separati a sud di Chioggia nella laguna di Brondolo;
 - 1458 - 1583: Realizzazione del *parador di Brondolo*, dapprima palificata in *grisiolo*, poi argine in terra a separazione delle lagune di Brondolo e Venezia, allo scopo di proteggere quest'ultima dagli interrimenti;
 - 1610: Creazione del canale *Brenta Novissimo* da Mira a Brondolo utilizzato come "collettore delle acque basse" dei fiumi sfocianti in laguna;
-

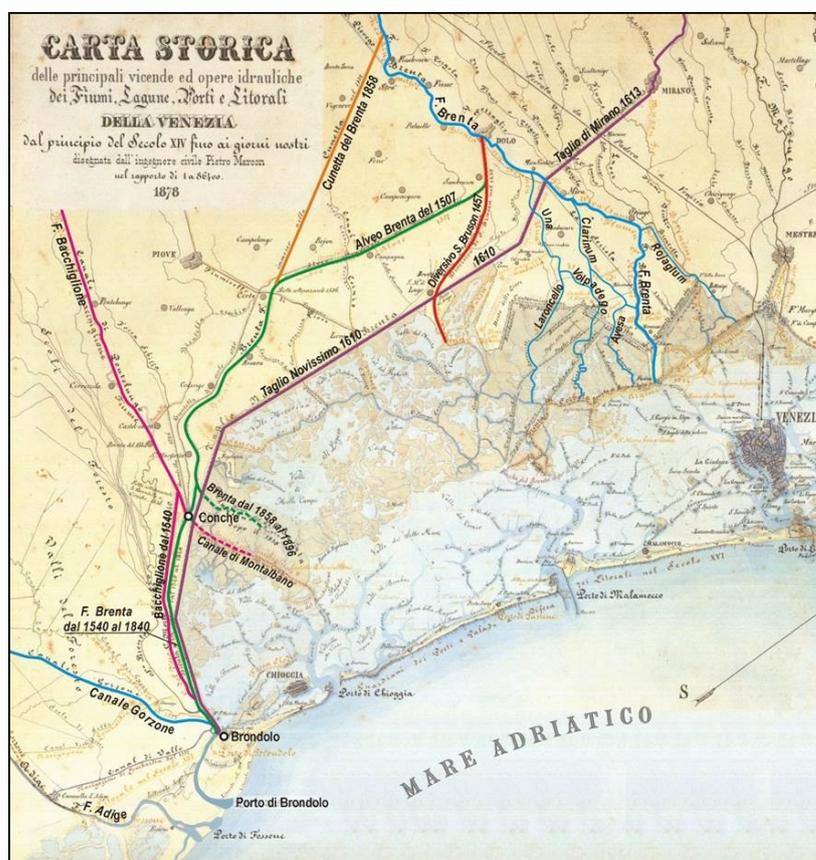


Figura 1.4: Le deviazioni e le nuove inalveazioni del Brenta realizzate dopo gli interventi di intestadura attuati nel corso del XIV secolo per difendere la laguna dagli interrimenti, riportate nella carta di Pietro Marcon (1878). (Tratta da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010)

- 1613: Deviazione delle acque dei fiumi minori Muson Vecchio, Tegola, Tergolino, Bottenigo, Pionca e Volpego nel canale Novissimo tramite il *Taglio di Mirano*;
- Inizio 1600: Apertura inalveazione tra Torre dei Burri e Pontevigodarzere, detta *Muson dei Sassi*, allo scopo di convogliare le maggiori portate in arrivo dal Muson e dai fiumi minori direttamente verso il Brenta.

Apertura dei canali *Bondante di Sopra e di Sotto* allo scopo di raccogliere le acque della riviera del Brenta tra Dolo e l'argine di intestadura e convogliarle nella laguna di Malamocco;

- 1547 - 1612: Creazione delle opere di sostegno alla navigazione interna: *piani inclinati* a Fusina e Marghera; *sostegni a conca* a Dolo (1547), Brondolo (1600 circa), Moranzano (1607) e Mira (1612);
- 1840: Adempimento del *Piano Fossombroni-Paleocapa*: sistemazione del Bacchiglione a Padova e reintroduzione del Brenta e del Novissimo nel bacino di Chioggia, con suo inevitabile impaludimento;
- 1896: Ristabilimento a Brondolo della foce del Brenta e suo collegamento con il Gorgone poco a monte.

Interventi Laguna Nord

Fiumi principali: *Piave, Sile*.

- 1534 - 1543 Realizzazione dell'*Argine di San Marco* tra Ponte di Piave e Cava di Caligo per contenere le esondazioni del Piave in destra;
 - *Metà 1500*: Creazione di diversivi, tra i quali il *Taglio di Re*, tra Musile e Cortellazzo in sinistra Piave ed escavazione del canale *Cava Zuccherina* per portare il Piave da Jesolo a Cortellazzo, allo scopo di alleggerire le sue piene nel tratto terminale;
 - 1642 - 1664: Deviazione del Piave con sbocco nei pressi di Porto Santa Margherita, nel Lago della Piave nell'antica laguna di Eracela, allo scopo di proteggere la bocca di S. Nicolò dall'interrimento, con conseguente spostamento della foce del Livenza a Foce Nicessolo;
 - 1683: Rotta degli argini del Lago della Piave, con conseguente e definitivo spostamento dello sbocco del Piave a Cortellazzo;
 - 1683: Deviazione del Sile e di altri fiumi minori (Vallio, Meolo, Musementre) verso l'alveo abbandonato del Piave, con la costruzione del *Taglio di Sile* per evitare l'eccessiva dolcificazione delle acque della laguna;
 - 1695: Apertura a valle di Portegradi dello *sfiatore Businello* verso laguna, per agevolare lo scolo delle acque nel territorio interessato dal Sile. Venne chiuso nel 1769 e poi definitivamente riaperto nel 1818.
-



Figura 1.5: Gli interventi di contenimento e le deviazioni del Piave e del Sile operate dai veneziani a difesa della laguna, riportati nella carta di Pietro Marcon del 1878. (Tratta da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010)

Si sottolinea come gli interventi volti alla conservazione della laguna successivi al 1500, e dunque alla creazione del Magistrato alle Acque, divennero irrinunciabili per il Senato della Repubblica, tanto che qualsiasi intervento, per quanto oneroso in termini economici e dannoso per il territorio circostante, diventava accettabile.

Con questo non si vuole negare il raggiungimento del risultato ultimo di diminuire l'apporto di acque dolci e dei sedimenti in essi presenti alla laguna, quanto la mancata considerazione dell'incremento dell'effetto erosivo e delle variazioni sull'ecosistema a cui tali interventi hanno lentamente condotto (D'Alpaos, 2010).

1.3.2 La costruzione dei moli alle bocche di porto

Il problema del mantenimento in efficienza delle bocche di porto per ragioni militari ed economiche diventò fondamentale dopo il 1300, quando la sempre maggiore dimensione delle imbarcazioni utilizzate andava a cozzare con l'inesorabile interrimento degli ingressi alla laguna.

Di particolare interesse era la sorte della bocca di S. Nicolò, ingresso fondamentale se non unico dei natanti indirizzati al porto di Venezia, che in parte per la deposizione dei sedimenti del Piave in mare e in parte per suoi effetti in laguna, era soggetta a una sempre maggiore diminuzione delle sue dimensioni e delle portate scambiate. Tale fenomeno era accentuato dall'incremento delle portate passanti a Malamocco, dovuto probabilmente all'occlusione delle bocche minori ad essa limitrofe, che nella visione della laguna come un elemento unitario comportavano la riduzione delle portate passanti a S. Nicolò, e dunque della capacità erosiva ad essa associata.

L'impossibilità di produrre interventi adeguati alla risoluzione del problema, dovute a richieste dal punto di vista tecnico ed esecutivo insormontabili per l'epoca, portarono nei primi decenni del 1700 alla sostituzione della bocca di S. Nicolò con quella di Malamocco come accesso principale alla laguna, costringendo cautelativamente le navi di maggiore dimensione a seguire il canale d'uscita dalla bocca, evitando la sua *barra di foce*.

Si ricorda come la formazione della barra sia agevolata dall'alto apporto detritico proveniente in parte dalla laguna e in parte dal trasporto solido litoraneo esterno, alimentato dai fiumi posti a nord della laguna, ed influenzato dalla preponderante azione del vento di Bora.

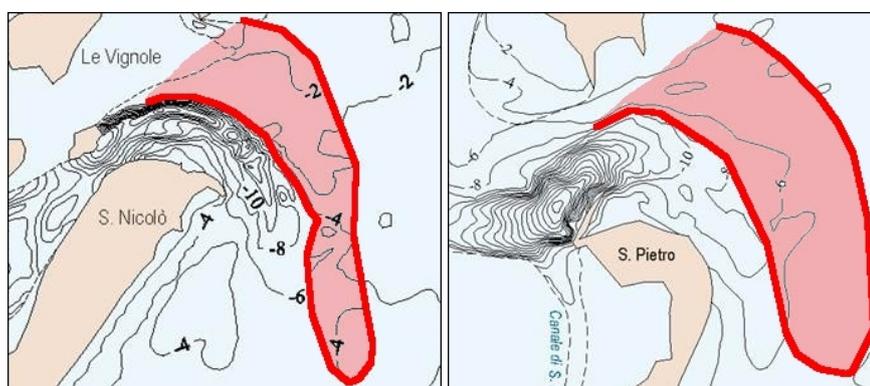


Figura 1.6: Barra di foce a Lido (sinistra) e Malamocco (destra)

Bocca di porto di Malamocco

Seppur le prime idee dal punto di vista progettuale risalgono al 1551, con la proposta di Sabbatino di irrobustire i moli laterali alla bocca di Lido per maggiorarne la capacità erosiva, per l'epoca inattuabile dal punto di vista tecnico, i primi veri interventi alle bocche si concretizzarono solo dopo la caduta della Serenissima.

- *Primi anni del XIX secolo*: sotto il governo napoleonico prese corpo l'idea di rompere le barre di foce armando le bocche con moli foranei spinti verso il mare;
- *1806*: istituzione di una commissione di esperti, detta *Commissione Prony* (dal nome del suo presidente Gaspard de Prony), la quale dopo un accurato rilievo della batimetria e delle velocità delle correnti di marea, redasse un progetto per la costruzione di moli foranei per la bocca di Malamocco;
- *1813*: Inizio dei lavori alla bocca di porto di Malamocco, con la creazione dei primi tratti della diga nord;
- *1839 - 1846*: realizzazione della diga nord sotto il governo austriaco. L'opera presentava una lunghezza complessiva di 2122 m, con il tratto finale leggermente inclinato per proteggere l'imboccatura dagli effetti del vento di Bora;
- *1853 - 1872*: realizzazione della diga sud, formata da un tratto iniziale di 424 m avente andamento convergente al molo opposto e da un tratto successivo di 532 m disposto parallelamente a questa struttura.

L'insieme delle opere comportò complessivamente il raggiungimento lungo tutto il canale di fondali minimi di 9 - 10 m, più che sufficienti per porre rimedio alle esigenze della navigazione dell'epoca. Anche i canali interni alla laguna in prossimità della bocca di porto furono assoggettati ad un non trascurabile approfondimento, in quanto interessati da un maggiore deflusso.

Come auspicato, la creazione dei moli foranei portò alla naturale rottura della barra di foce, grazie alla crescita delle velocità locali delle correnti e della loro capacità erosiva come conseguenza diretta.

Bocca di porto di Lido

A seguito dell'annessione del Veneto all'Italia nel 1866, visti gli ottimi risultati ottenuti per la bocca di Malamocco, si volle ripetere la medesima esperienza anche nella laguna settentrionale.

Un primo intervento prevedeva l'unione delle tre bocche di Treporti, S. Erasmo e S. Nicolò in un unico grande varco, allo scopo di ridurre i costi delle successive opere e di agevolare le operazioni commerciali con i maggiori porti limitrofi.

La costruzione delle opere alla bocca avvenne tra il 1882 e il 1892.

- Dapprima venne costruita la diga nord, in due successive riprese che la portarono alla sua lunghezza complessiva di 3600 m;
- Poi venne costruita la diga sud, proseguendo in contemporanea da terra e da mare, per uno sviluppo complessivo di 3300 m.

Seppur in prima battuta gli effetti di approfondimento della foce furono molto evidenti (fino a 8 - 9 m), questi non si manifestarono nella zona esterna interessata dalla barra di foce, vista la composizione del suolo a base di sabbia e argilla sovraconsolidata, la cui rimozione fu possibile solo tramite non semplici interventi di dragaggio.

Bocca di porto di Chioggia

Anche la bocca di Chioggia venne infine interessata dalla realizzazione delle medesime opere di difesa, visto il successo ottenuto nelle altre due bocche.

- *1910*: Inizio dei lavori per la costruzione della diga nord. Allo scoppio della guerra i lavori vennero bruscamente interrotti, lasciando la diga nord quasi completa e quella a sud nella sua fase iniziale;
- *1930 - 1934*: Ripresa e completamento dei lavori alle dighe foranee, fortemente danneggiate dall'azione delle mareggiate. Diga nord e sud si protendevano in mare rispettivamente per 1800 e 1600 m.

Anche in questo caso i lavori portarono ad un notevole approfondimento dei fondali, che raggiunsero i 7 - 8 m.

Non si nega il fatto che tali modifiche siano alla base di tutta una serie di processi morfologici non considerati o previsti nella loro fase di progetto e successiva esecuzione (D'Alpaos, 2010).

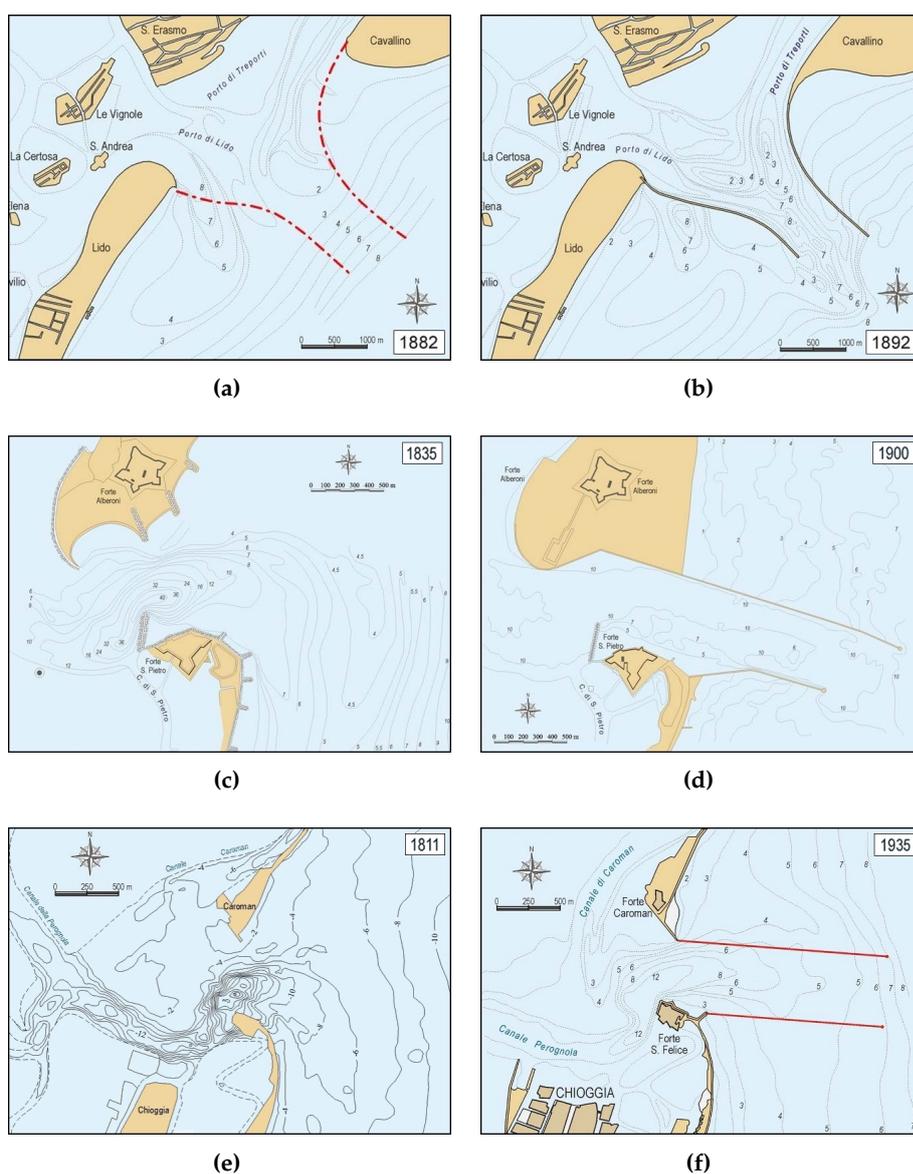


Figura 1.7: Configurazione e batimetria delle bocche di porto prima e dopo la costruzione dei nuovi moli.

a) Lido 1882; b) Lido 1892; c) Malamocco 1835; d) Malamocco 1900;

e) Chioggia 1811 ; f) Chioggia 1935.

(Tratte da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010)

1.3.3 Lo scavo dei grandi canali navigabili

Canale di S. Spirito

L'escavazione dei grandi canali navigabili trova la sua genesi nel 1725, quando il Senato della Repubblica approvò con un decreto la realizzazione di un canale, atto a collegare la bocca di Malamocco con il bacino di S. Marco, per porre rimedio al progressivo interrimento della bocca di S. Nicolò, ormai inservibile al passaggio delle navi di maggior dimensione.

Al taglio, noto come *canale di S. Spirito*, che si sviluppava tra le isole di Poveglia, S. Spirito e S. Clemente, sfruttando i canali naturali Rocchetta, Malamocco e Orfano, fu inizialmente assegnata una profondità di 4 m e una larghezza in cunetta di 14 m, successivamente ampliate a 4.5 m (poi ulteriormente aumentata a 7.5 m) e 18 m.

Il suo percorso e le sue dimensioni ridotte non produssero effetti considerevoli sul regime delle correnti di marea.



Figura 1.8: Il tracciato del canale navigabile di S. Spirito, realizzato nel 1726 per collegare il porto di Malamocco a Venezia, evidenziato sulla carta di Angelo Emo (1763) (Tratta da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010)

Canale Vittorio Emanuele III

Il canale Vittorio Emanuele III venne scavato tra il 1920 e il 1925, approfondendo e ampliando un canale precedentemente utilizzato come canaletta di servizio per il trasporto verso Marghera dei materiali di risulta per la costruzione delle banchine della Marittima.

Suo scopo secondario era il collegamento del futuro polo industriale con la bocca di S. Nicolò, per promuovere lo sviluppo economico della città.

Per l'adempimento delle sue iniziali funzioni gli vennero attribuiti un fondale di 9 - 10 m e una larghezza in cunetta di 28 m, successivamente allargata a 50 m. A seguito della Guerra il fondale venne ulteriormente approfondito a 11 m, riducendo la larghezza a 40 m.

La sua costruzione tolse rapidamente importanza al canale di S. Spirito, diventando la direttrice principale del traffico lagunare. Oltre al moto dei natanti, venne agevolato anche quello delle correnti di marea, capaci ora di raggiungere i bordi della laguna molto più velocemente rispetto alle zone intermedie ad essi adiacenti. Questo modificò localmente il regime delle correnti, provocando nei canali limitrofi e nello stesso taglio dei rilevanti processi di sedimentazione.

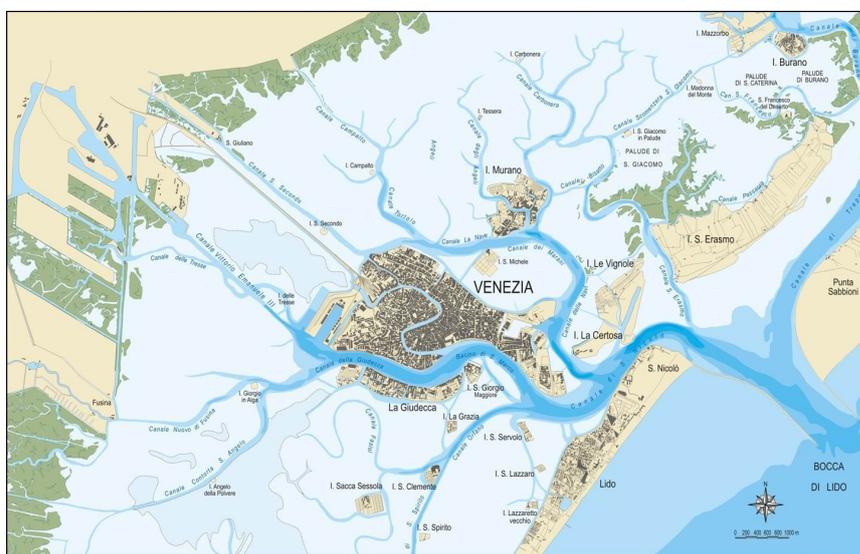


Figura 1.9: Il tracciato del canale navigabile Vittorio Emanuele III costruito (1920-1925) per collegare la I Zona Industriale di Porto Marghera direttamente al mare (Tratta da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010)

Canale Malamocco - Marghera

Il canale Malamocco - Marghera, progettato a cura del Genio Civile Opere Marittime, venne realizzato negli anni compresi tra il 1964 e il 1968.

Il suo tracciato comprende tre parti: un tratto iniziale, diretta prosecuzione della bocca di Malamocco, che si estende con profondità di 14.5 m e larghezza di 150 m fino all'altezza del porto di S. Leonardo, dove devia con un'ampia curva; il secondo tratto che comprende tutto il limitare della laguna fino al porto di Marghera, diviso in due ulteriori tratti, uno con profondità 12.5 m e larghezza 100 m, fino a Motte di Volpego, l'altro con profondità 10 m e larghezza 60 m fino al porto industriale.

La sua disposizione anomala rispetto alla direzione dei canali naturali e le sue notevoli dimensioni sono state fonte di forti, dannose ed inevitabili modifiche nei confronti dell'idrodinamica lagunare.

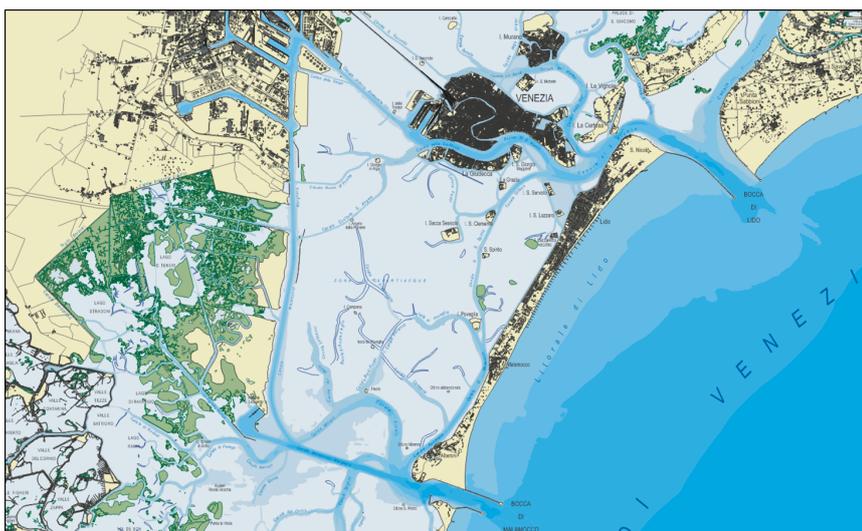


Figura 1.10: Il tracciato del canale Malamocco-Marghera costruito tra gli anni 1964 e 1968 per collegare direttamente la bocca di Malamocco con la Zona Industriale di Porto Marghera. (Tratta da: "Fatti e misfatti di idraulica lagunare", D'Alpaos, 2010)

1.3.4 Le nuove opere alle bocche di porto

Le nuove opere alle bocche di porto sono brevemente descritte anche dal punto di vista dell'elaborazione numerica al Capitolo 2.

1.4 Il fenomeno della marea

Il fenomeno della marea descrive i periodici movimenti di innalzamento e abbassamento della superficie del mare, e più in generale degli specchi d'acqua di maggiori dimensioni, dovuti principalmente all'attrazione esercitata dei corpi celesti su tali masse idriche e allo stato dell'atmosfera.

La marea si presenta come un'onda per lo più sinusoidale avente lunghezza e periodo molto elevati.

In relazione alla natura della periodicità possono distinguersi:

- *Maree diurne o declinazionali* quando si verificano solamente un'alta e una bassa marea al giorno;
- *Maree semidiurne o sinodiche* quando si verificano due alte maree e due basse maree al giorno, di ampiezza poco differente;
- *Maree miste o sinodiche-declinazionali* qualora si verificano due alte maree e due basse maree al giorno, di ampiezza molto differente.

Con i termini *ampiezza di marea* o *escursione di marea* si intende la differenza tra il cavo e la cresta dell'onda sinusoidale che la descrive, che vengono più comunemente indicate con i termini *bassa marea* e *alta marea*.

In relazione all'ampiezza possono distinguersi:

- *Microtides*: se < 2 m;
- *Mesotides*: se $2 \div 4$ m;
- *Macrotides*: se > 4 m.

L'ampiezza delle maree è diversa in relazione alla morfologia dei bacini in cui queste si verificano, parendo da un minimo di 25 - 30 cm registrati nelle zone centrali degli oceani (Midway) e arrivando a picchi massimi di 13 - 20 m registrati lungo le coste (19.6 m nella Baia di Fundy).

Nel bacino del Mediterraneo la marea è di tipo semidiurna presentandosi come mista in alcune zone, dove l'ampiezza è generalmente inferiore ai 50 cm.

La laguna di Venezia è interessata da maree miste, con ampiezze i cui picchi superano in particolari condizioni anche il metro.

Maree Astronomiche

La marea astronomica è causata dall'attrazione gravitazionale che i corpi celesti, principalmente Luna e Sole, esercitano sulle masse d'acqua.

Sua peculiarità è quella di essere calcolabile con una elevata precisione anche con molti anni di anticipo.

Il suo manifestarsi dipende dall'interazione tra più forze (fig. 1.11)

- La *forza centrifuga* esercitata sulle massa d'acqua a causa della rotazione del sistema Terra - Luna attorno al proprio baricentro;
- La forza dovuta all'*attrazione gravitazionale* esercitata dai corpi celesti nei confronti delle masse idriche presenti sulla superficie terrestre.

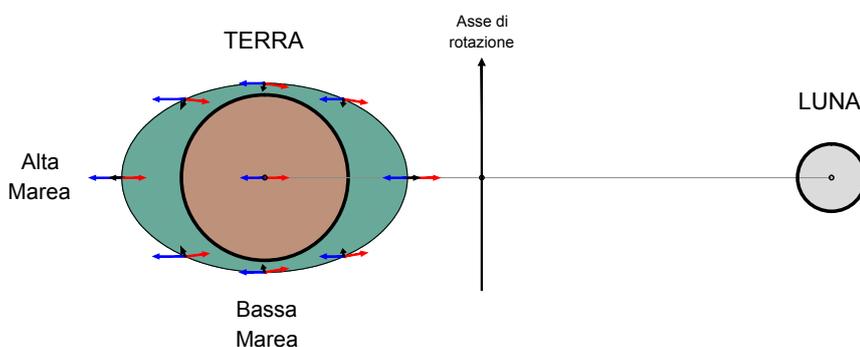


Figura 1.11: Forze agenti nella generazione della marea astronomica: attrazione gravitazionale (rosso), forza centrifuga (blu) e risultante (nero)

Tra i corpi celesti, quelli il cui effetto sulla marea risulta maggiore sono ovviamente la Luna e il Sole: il primo per la maggiore vicinanza, il secondo per le maggiori dimensioni. Pur essendo la dimensione della Luna estremamente inferiore rispetto a quella del Sole, la sua minore distanza le permette di esercitare un effetto di molto maggiore. Il rapporto tra le forze esercitate dai due satelliti è pari a 0.46.

La posizione relativa tra Sole, Luna e Terra comporta la formazione di due diversi tipi di maree.

- La *marea di sizigia* (*Spring Tide*) si ha con l'allineamento dei tre corpi celesti, che si verifica durante le fasi di Luna nuova e Luna piena. In questo caso l'effetto della marea solare e lunare si sommano;

- La *marea di quadratura* (*Neap Tide*) si ha quando i tre corpi sono per l'appunto in quadratura, che si verifica in concomitanza con la formazione del primo e del terzo quarto della Luna. In questo caso l'effetto della marea solare si sottrae a quello della marea lunare, diminuendone l'intensità.

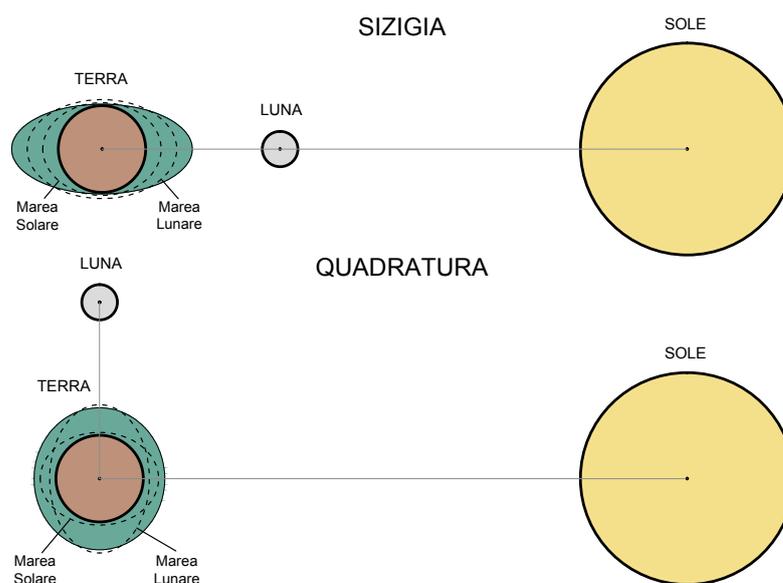


Figura 1.12: Comportamento della marea astronomica in relazione al diverso allineamento tra i corpi celesti

Maree Meteorologiche

La marea meteorologica è l'insieme delle variazioni del livello marino, con periodi compresi tra pochi giorni e poche ore, causate dal vento e dalle differenze di pressione dell'aria sul mare durante il transito delle perturbazioni atmosferiche.

- Gli effetti del *vento* sono strettamente legati alla dimensione del bacino di riferimento e di conseguenza al fetch, alla direzione del vento e alla sua intensità;
- Un incremento della *pressione atmosferica* comporta necessariamente una riduzione del livello idrico, visto l'incremento del carico portato sulla superficie. Di conseguenza ad una riduzione della pressione

consegue un aumento del livello.

Le variazioni sono dell'ordine di $\pm 2 \text{ cm/hPa}$.

La sua prevedibilità in termini di accuratezza e anticipo è molto ridotta rispetto a quella della marea astronomica, vista la forte aleatorietà degli elementi che la caratterizzano.

1.4.1 Previsione e calcolo della marea in Laguna

Per calcolare la marea astronomica in una determinata località, ci si basa sulla scomposizione della marea in componenti armoniche.

Si assume dunque che il livello ad ogni istante t si ottenga come somma di più onde sinusoidali.

$$H(t) = \sum_i a_i(t) = \sum_i A_i \cos(\omega_i t - \varphi_i) \quad (1.1)$$

con A_i ampiezza, ω_i velocità angolare e φ_i ritardo di fase delle singole componenti. A tale valore si aggiunge il livello medio di riferimento osservato nel periodo 2001-2015, pari a circa 30 cm sullo Zero Mareografico di *Punta della Salute 1897*.

A Venezia sono sufficienti otto componenti armoniche per ricostruire il segnale di marea astronomica con la precisione del centimetro, considerato come il limite degli errori di misura, oltre il quale dunque non ha senso spingersi.

Le componenti principali sono:

- M2: *lunare semidiurna principale*
 - S2: *solare semidiurna principale*
 - N2: *lunare semidiurna ellittica maggiore*
 - K2: *lunisolare declinazione semidiurna*
 - K1: *lunisolare declinazione diurna*
 - O1: *lunare diurna principale*
 - P1: *solare diurna principale*
 - S1: *onda diurna meteorologica*
-

La previsione delle maree nella Laguna è compito dall'Istituzione Centro Previsioni e Segnalazioni Maree (ICPSM), noto come *Centro Maree*, che si avvale di alcuni strumenti modellistici qui brevemente descritti.

Modelli statistici

Si basano sulla valutazione statistica della marea meteorologica a Venezia come *combinazione lineare* delle maree osservate e dei parametri di pressione misurati in diverse stazioni presenti in Laguna, lungo le coste del Mare Adriatico e nell'entroterra.

La versione più aggiornata del modello si basa la scelta dei più corretti coefficienti di combinazione lineare in funzione delle condizioni meteorologiche presenti in Laguna. Alla marea meteorologica viene poi sommato il valore della componente astronomica, calcolata come somma delle armoniche fondamentali.

I coefficienti della combinazione lineare sono stati calcolati durante le fasi di calibrazione del modello.

Modelli idrodinamici

Sono modelli di natura deterministica. Si basano sull'integrazione delle equazioni idrodinamiche nell'ipotesi shallow-water in tutto il bacino considerato, ottenendo come risultato lo stato del mare, il livello e le correnti, sotto l'azione delle forzanti meteorologiche.

- Un modello, detto **SHYFEM**, si basa sull'applicazione del *metodo degli Elementi Finiti (FEM)* all'intero bacino del Mar Mediterraneo.

La griglia computazionale è formata da elementi triangolari, la cui dimensione varia da 35 km nel Mediterraneo, a 1.5 km nella zona dell'Alto Adriatico. A questa griglia viene associata quella della Laguna, la cui risoluzione scende fino ai 100 m;

- Un altro modello, detto **HYPSE**, integra le equazioni dinamiche dei fluidi attraverso il *metodo alle Differenze Finite (FDM)*.

Si basa su una griglia curvilinea la cui risoluzione varia da 2.7 km nell'Alto Adriatico a 8 km nella parte Sud.

Il modello si basa su un sistema di autocorrezione sui valori dei livelli osservati.

1.4.2 Acque alte ed eventi eccezionali

Con il termine acqua alta si identifica il fenomeno di formazione di picchi di marea molto pronunciati che si verificano con una certa periodicità nella zona dell'Alto Adriatico, frequenti soprattutto nel periodo primaverile e autunnale.

Tale fenomeno si verifica qualora l'alta marea astronomica coincida con l'alta marea meteorologica, presente in laguna quando concorrono le condizioni di bassa pressione e forte vento di Scirocco.

Per la città di Venezia si ha la seguente classificazione in relazione allo zero mareografico di Punta della Salute (PDS) 1897:

- *Marea sostenuta*: il livello di marea è compreso tra +80 cm e +109 cm;
- *Marea molto sostenuta*: il valore è compreso tra +110 cm e +139 cm;
- *Alta marea eccezionale*: il valore raggiunge o supera i +140 cm.

Tra gli eventi eccezionali che si sono susseguiti nel bacino della laguna, quello di maggiore entità fu senza dubbio quello del 4 novembre 1966, "el dì del'Aqua granda", in cui il livello della marea raggiunse i +194 cm sullo zero mareografico alle ore 18.00.

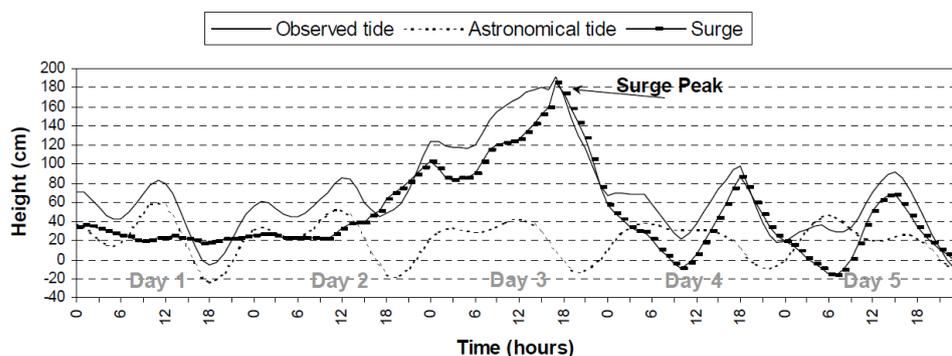


Figura 1.13: Livello delle onde e delle maree a Venezia (PDS): 2-6 novembre 1966

A seguito di tale evento si sono susseguiti gli studi che hanno portato dapprima alla creazione del cosiddetto "Progettone" e poi all'attuale progetto del Mo.S.E., la cui principale funzione dovrebbe essere la protezione dei territori interni alla laguna dalle acque alte e il cui studio degli effetti sull'idrodinamica lagunare sono alla base del presente lavoro.

Capitolo 2

Il Modello Numerico

2.1 Il modello

Per la corretta rappresentazione dei fenomeni idrodinamici che interessano il bacino della laguna è stato impiegato un modello basato sulla soluzione numerica con il metodo agli elementi finiti, delle equazioni di propagazione di un'onda di marea in ipotesi bidimensionali, accoppiando elementi 1D e 2D.

Lo schema che se ne ottiene permette di rappresentare in modo soddisfacente sia gli aspetti globali di propagazione della marea (livelli e velocità) tanto nelle parti centrali quanto in quelle più periferiche della laguna, sia quelli locali legati alla caratterizzazione dei deflussi interni ai rii. Quest'ultimo risultato sarebbe irrealizzabile per mezzo di singoli elementi bidimensionali, vista la dimensione estremamente contenuta degli elementi richiesti.

Per questo motivo i rii stessi sono stati schematizzati all'interno del reticolo di calcolo utilizzando elementi 1D.

Tale modello è stato messo a punto dai ricercatori del gruppo di Idraulica del DICEA.

2.2 Modello 2D

2.2.1 Equazioni

La soluzione dei modelli bidimensionali è basata sull'integrazione delle classiche equazioni di DSV. Il loro impiego in domini come quello della laguna veneziana è però limitato.

Un forte limite riguarda l'estrema propensione dei territori, non solo limitrofi alla laguna, di essere assoggettati a successivi fenomeni di asciugatura e allagamento causati dall'azione intermittente di propagazione dell'onda di marea (si pensi alle zone di barena o alle velme che caratterizzano il paesaggio lagunare). Essendo le equazioni di DSV strettamente utilizzabili per la soluzione numerica di domini "bagnati", la loro applicabilità viene dunque meno.

Ad amplificare l'instabilità prodotta dal passaggio tra le fasi di asciutto e bagnato vi è la forte irregolarità del fondo lagunare. Questo risulta difficilmente rappresentabile se non con un numero estremamente alto di maglie che renderebbero insostenibile, o almeno non giustificato, lo sforzo computazionale richiesto per la risoluzione del problema numerico.

La ricerca di stabilità e accuratezza numerica da parte dell'algorithm sia nelle fasi di asciutto che di bagnato, seppur fondamentale, è dunque un aspetto non facile da ottenere.

L'approccio scelto per la soluzione del problema si basa sulla riformulazione delle equazioni di flusso su domini parzialmente bagnati introducendo il concetto di *media in fase* per rappresentare il vero volume d'acqua presente in ogni elemento (ϑ), e il concetto di *sottogriglia topografica* utilizzando un parametro in grado di descrivere la dimensione delle macroasperità del terreno (a_r).

Le nuove equazioni di flusso si ottengono con i seguenti passaggi:

- Partendo dalle *Equazioni di Navier-Stokes* scompongo le variabili in due componenti: una media e una fluttuante. Ottengo dunque le equazioni *RANS: Reynolds' Averaged Navier-Stokes*.
-

- Supponendo trascurabili le accelerazioni in direzione verticale otten-
go le *Equazioni di Reynolds per moti prevalentemente orizzontali*.

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (uv) - \nabla \cdot T_x = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} + \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (vv) - \nabla \cdot T_y = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (2.4)$$

Dove si nota che in direzione verticale, secondo l'eq. 2.3, si ha distri-
buzione idrostatica delle pressioni.

- Operando una media in fase e successivamente integrando sulla ver-
ticale tra la superficie libera h e il fondo z_b , si ottengono le *Equazioni
di DSV modificate per descrivere in modo computazionalmente efficiente e
numericamente stabile la transizione asciutto - bagnato*.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_{xx} \frac{q_x^2}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_{xy} \frac{q_x q_y}{Y} \right) \\ & - \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} - \frac{\tau_{wx}}{\rho} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{S}{\eta} U_x|_{z=h} = 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_{xy} \frac{q_x q_y}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_{yy} \frac{q_y^2}{Y} \right) \\ & - \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} - \frac{\tau_{wy}}{\rho} + \frac{\tau_{by}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{S}{\eta} U_y|_{z=h} = 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\eta \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = S \quad (2.7)$$

dove h è la quota della superficie libera, $q = (q_x, q_y)$ è la velocità
integrata sulla verticale, Y è la profondità media dell'acqua, g è l'ac-
celerazione gravitazionale, ρ è la densità dell'acqua, K_s è la scabrezza
secondo Gauckler-Strickler, $\tau_w = (\tau_{wx}, \tau_{wy})$ è la tensione tangenziale
superficiale dovuta al vento, w è la velocità della sorgente, η è l'a-
rea bagnata per unità di superficie ($0 \leq \eta \leq 1$) e H è la profondità
dell'acqua.

2.2.2 Parametri

Nelle equazioni 2.5, 2.6 e 2.7 si incontrano i seguenti parametri:

- Il *tirante effettivo*, o il volume per unità di superficie:

$$Y = \int_{-\infty}^h \vartheta dz \quad (2.8)$$

- I *parametri di correzione* per tenere in considerazione la non uniforme distribuzione della velocità lungo la verticale:

$$\epsilon_{xx} = \frac{Y}{q_x^2} \int_{-\infty}^h \frac{U_x^2}{\vartheta} dz \quad (2.9)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{Y}{q_x q_y} \int_{-\infty}^h \frac{U_x U_y}{\vartheta} dz \quad (2.10)$$

- La *variazione spaziale dei radiation stresses*, descrivente lo scambio laterale di quantità di moto in funzione della viscosità turbolenta e delle irregolarità del fondo:

$$\frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} = 2\nu_e \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \right) + \nu_e \left(\frac{\partial q_x}{\partial y} + \frac{\partial q_y}{\partial x} \right) \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} = \nu_e \left(\frac{\partial q_y}{\partial x} + \frac{\partial q_x}{\partial y} \right) + 2\nu_e \left(\frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (2.12)$$

descrivibili in funzione di una viscosità apparente ν_e , assunta per semplicità isotropa.

- Lo *sforzo al fondo*, ottenuto considerando un flusso uniforme nella direzione di riferimento:

$$\tau_{bi} = -\rho g Y \frac{\partial h}{\partial x} = \rho g Y J_i \quad (2.13)$$

con J_i la variazione energetica nella direzione i , costante nella sezione di riferimento e ottenuta per mezzo dell'equazione di Manning:

$$J_i = \frac{n^2 |\mathbf{q}| q_i}{H^{10/3}} \quad (2.14)$$

con n coefficiente di scabrezza secondo Manning, $\mathbf{q} = \sqrt{q_x^2 + q_y^2}$ e H livello idrico equivalente.

2.2.3 Media in fase

L'operazione di media in fase (descritta come $\langle \dots \rangle$) si basa sull'introduzione della funzione di fase $\varphi(\mathbf{x})$.

$$\varphi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & z > h_b \\ 0 & z \leq h_b \end{cases} \quad (2.15)$$

dove h_b è la quota locale del fondo e $\mathbf{x} = (x, y, z)$ è il vettore delle coordinate spaziali. La posizione del fondo viene ricavata dalla *delta function* $\nabla\varphi(x)$ la cui direzione è quella della normale al fondo n_b .

Applicando la media in fase su di una generica funzione del campo di moto $f(\mathbf{x}, t)$ si ottiene:

$$F(\mathbf{x}, t) = \langle \varphi(\mathbf{x}) \cdot f(\mathbf{x}, t) \rangle = \frac{1}{A} \int_A \varphi(\mathbf{x}) f(\mathbf{x}, t) dA \quad (2.16)$$

Possono dunque essere introdotti i seguenti parametri:

$$\vartheta(\mathbf{x}) = \langle \varphi(\mathbf{x}) \rangle \quad (2.17)$$

$$\eta = \vartheta(x, y, h) \quad (2.18)$$

Dove $\vartheta(\mathbf{x})$ descrive la frazione della generica superficie A la cui quota superi quella del fondo ed η fornisce la medesima informazione in relazione alla superficie del pelo libero posizionata a quota h (fig. 2.1).

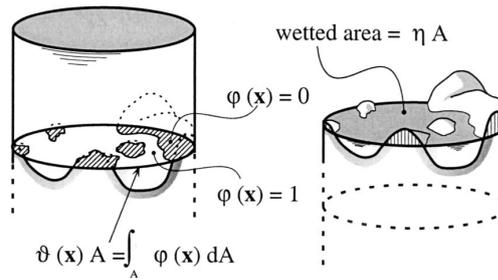


Figura 2.1: Descrizione dei parametri φ , ϑ e η

Dal punto di vista statistico la funzione $\vartheta(\mathbf{x})$ può considerarsi come la probabilità che la quota locale del fondo h_b non ecceda la generica quota z . Di conseguenza la funzione densità di probabilità delle quote del fondo all'interno di A può essere assunta pari a $\frac{\partial\vartheta(\mathbf{x})}{\partial z}$.

Una appropriata caratterizzazione della misura delle irregolarità del fondo può perciò essere fatta in funzione della deviazione standard delle sue quote:

$$a_r = 2\sigma_b \quad (2.19)$$

Il parametro a_r può dunque considerarsi comparabile con la maggiore dimensione delle ampiezze delle irregolarità del fondo presenti nella superficie di riferimento A.

Assumendo la distribuzione delle quote del fondo Gaussiana, la funzione $\vartheta(\mathbf{x})$ assume la forma:

$$\vartheta(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} [1 + \text{erf}(\zeta)] \quad (2.20)$$

considerando $\zeta = \frac{2(z - \mathbf{h}_b)}{a_r}$ e $\text{erf}()$ = *error function*.

Riprendendo le eq. (2.8) e (2.18) si ottengono le relazioni:

$$\eta = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \text{erf} \left[\frac{2(z - \mathbf{h}_b)}{a_r} \right] \right\} \quad (2.21)$$

$$Y = a_r \left\{ \eta \frac{h - \mathbf{h}_b}{a_r} + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \exp \left[-4 \left(\frac{h - \mathbf{h}_b}{a_r} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.22)$$

riportate in fig. 2.2.

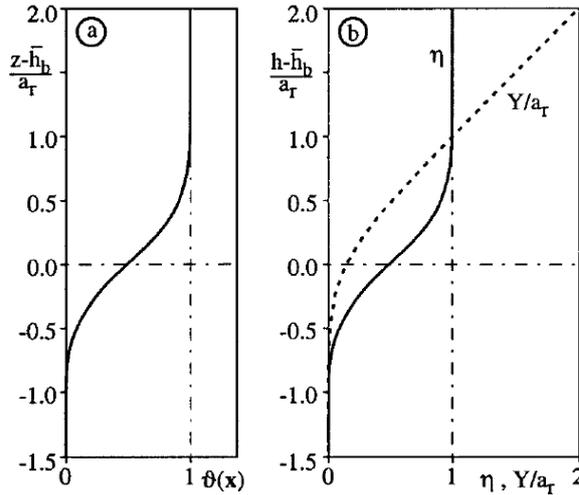


Figura 2.2: Comportamento delle funzioni φ , η e Y

Si nota come quando $D = h - \mathbf{h}_b > a_r$, $\eta \rightarrow 1$ e $Y \rightarrow D$, ottenendo nuovamente le equazioni di DSV.

2.2.4 Effetti del vento

Lo sforzo di attrito sulla superficie libera prodotto dal vento viene calcolato come:

$$\begin{aligned}\tau_w &= c_w q_a W^2 \\ &= c_d \left(1 - e^{-\epsilon W}\right) W^2\end{aligned}\quad (2.23)$$

dove W è la velocità del vento e c_d e ϵ sono due coefficienti opportunamente tarati. Nel nostro caso $c_d = 1.62 \cdot 10^{-6}$ e $\epsilon = 0.05$.

La tensione può dunque essere scomposta nelle due componenti principali:

$$\tau_{wx} = \tau_w \cos \vartheta_w \quad (2.24)$$

$$\tau_{wy} = \tau_w \sin \vartheta_w \quad (2.25)$$

con ϑ_w direzione del vento.

2.2.5 Osservazioni

Le equazioni 2.5, 2.6 e 2.7 possono dunque essere impiegate con successo per la descrizione di flussi bidimensionali su superfici parzialmente asciutte.

In particolare si nota che:

- Qualora il livello dell'acqua sia preponderante rispetto alle dimensioni delle irregolarità di sottogriglia, le eq. 2.5, 2.6 e 2.7 si riducono alle classiche equazioni di DSV.

Quando $a_r \ll D$ l'area A può considerarsi completamente bagnata. Dunque $\eta = 1$ e $Y = D$. Inoltre quando $\frac{a_r}{D} \rightarrow 0$, q_x e q_y si riducono alle portate integrate sulla verticale (specifiche) nelle due direzioni;

- Le stesse considerazioni possono trarsi qualora $A \rightarrow 0$, da cui si può facilmente ottenere il limite $\frac{a_r}{D} \rightarrow 0$. Questo poichè quando i valori locale e medio della profondità del fondo sono comparabili, la dimensione delle irregolarità del fondo a_r diventa estremamente ridotta in relazione alla profondità D ;

- Nel caso in cui $a_r \gg D$ cadono diverse assunzioni fatte per ottenere le eq. 2.5, 2.6 e 2.7. In particolare il fondo non può più essere considerato piano bensì affetto da irregolarità che comportano la diversione del flusso all'interno delle maglie, rendendo il flusso *pluricursale* e incrementando di conseguenza le dissipazioni presenti. Sebbene la stabilità delle equazioni sia garantita, i risultati ottenuti possono considerarsi validi solamente in prima approssimazione;
- Un ulteriore problema si lega all'ipotesi di completa interconnessione delle maglie del dominio. Questo comporta che tutte le maglie interne al dominio di riferimento la cui quota sia inferiore rispetto a quella del livello dell'acqua risultino bagnate. Tale assunzione non può considerarsi vera per alcune aree isolate di A . La soluzione al problema risiede in un accurata modellazione e meshatura del dominio stesso.

2.3 Modello 1D

2.3.1 Equazioni

La soluzione del modello monodimensionale si basa sulla risoluzione delle *equazioni del moto e di continuità* opportunamente semplificate per essere applicate in assenza di termini convettivi e solamente su sezioni compatte (2.26 e 2.27), su cui poter dunque assumere costante la distribuzione della velocità, e opportunamente riviste per tenere conto delle relazioni con eventuali elementi bidimensionali.

$$\frac{\partial h}{\partial s} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q|Q|}{k_s^2 R_H^{4/3} A^2} = 0 \quad (2.26)$$

$$\eta(h) \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (2.27)$$

dove h è la quota del pelo libero, s è l'ascissa curvilinea descrivente l'andamento planimetrico dell'asse del canale, A è l'area della sezione trasversale, Q è la portata che transita nella sezione del canale, R_H è il raggio idraulico della sezione e η è la frazione bagnata del generico elemento bidimensionale adiacente.

Essendo il modello basato sulla coesistenza di elementi monodimensionali e bidimensionali, anche sovrapposti, nella scrittura del bilancio di

massa per ciascun nodo è necessario tenere in considerazione come una parte della portata fluente negli elementi monodimensionali sia già stata considerata nel calcolo degli elementi bidimensionali.

Tale valore può assumersi pari a:

$$\Delta Q = B \frac{Y_L(\mathbf{v}_L \cdot \mathbf{s}) + Y_R(\mathbf{v}_R \cdot \mathbf{s})}{2} \quad (2.28)$$

dove B è la larghezza del canale in superficie, \mathbf{v} è il vettore delle velocità relativo agli elementi bidimensionali adiacenti, Y è il volume d'acqua per unità di superficie (tirante effettivo), \mathbf{s} è il versore direzione dell'asse del canale e i pedici L e R indicano gli elementi bidimensionali a sinistra e a destra del canale.

La portata considerata nel bilancio di massa nodale è pari a $Q_a = Q - \Delta Q$.

L'equazione di continuità può dunque essere scritta come:

$$\left(1 - \frac{\eta_L + \eta_R}{2}\right) B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q_a}{\partial s} = 0 \quad (2.29)$$

dove η è la frazione bagnata dell'elemento bidimensionale adiacente al canale.

Considerando asciutti gli elementi bidimensionali adiacenti, si ottiene $\eta_L = \eta_R = 0$. Il valore della portata Q corrisponde dunque a Q_a , riportando l'equazione di continuità alla sua forma classica. Tale considerazione può farsi anche in assenza di elementi 2D adiacenti, considerando di fatto i canali infinitamente alti.

Nel caso in cui i valori di η_L e η_R siano prossimi all'unità, l'effetto di invaso del canale 1D viene inibito.

Lo scambio di portata tra gli elementi 1D e 2D viene considerato di pari entità nelle due direzioni, e dunque di fatto nullo nel suo complesso.

2.3.2 Osservazioni

Come già sottolineato, la corretta descrizione delle reti idrografiche minori viene svolta per mezzo di canali unidimensionali. Questi oltre a garantire e minori oneri computazionali al modello, garantiscono anche una più corretta descrizione dei fenomeni di prosciugamento e allagamento dei territori che ne sono interessati.

Nello schema adottato, l'accoppiamento di elementi monodimensionali e bidimensionali comporta un diverso funzionamento degli elementi 1D in relazione allo stato idrico degli elementi 2D ad essi sovrapposti.

- L'ipotesi di funzionamento più attinente al comportamento reale è illustrata in fig. 2.3a. In questa, indipendentemente dallo stato idraulico degli elementi bidimensionali adiacenti, il canale, qui posto a sezione rettangolare per semplicità, mantiene il proprio comportamento a *pelo libero*;
- L'ipotesi di funzionamento descritta in fig. 2.3b seppur meno verosimile risulta più versatile dal punto di vista della modellazione. In questo caso mente la parte superiore del canale viene conglobata negli elementi bidimensionali adiacenti, la parte inferiore mantiene la propria indipendenza, funzionando come un *canale in pressione a sezione costante*.

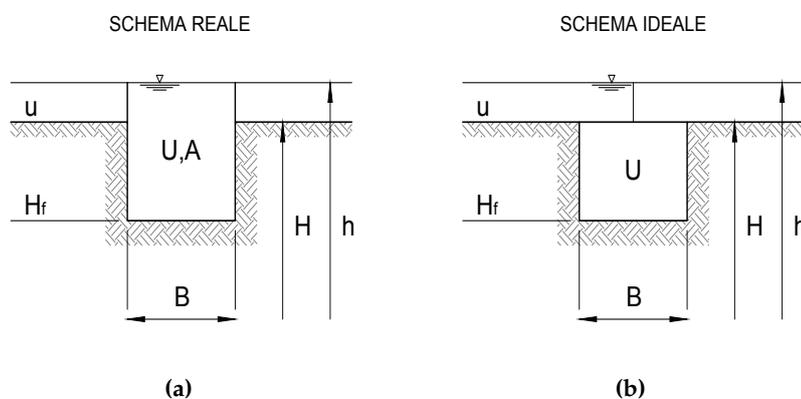


Figura 2.3: Schemi di calcolo dell'elemento monodimensionale "canale" in relazione agli elementi bidimensionali "maglie"

La maggiore versatilità dovuta a questo metodo descrittivo sta nella possibilità di inserire o togliere elementi monodimensionali dal modello senza apportare modifiche alla struttura del reticolo bidimensionale di base.

2.4 La laguna

L'intera superficie della laguna veneziana è stata schematizzata per mezzo di maglie triangolari bidimensionali, garantendo la corretta rappresentazione morfologica e batimetrica della stessa e permettendo di tenere conto dell'importante ruolo del diffuso e articolato reticolo di canali che ne costituisce il fondo, condizionandone in modo non indifferente l'intero comportamento idrodinamico.

Le maglie utilizzate presentano una dimensione variabile tra 10 e 400 m, per poter garantire un adeguato grado di raffittimento nelle posizioni dove si renda necessaria una maggiore accuratezza e precisione nella ricerca dei risultati e nell'attribuzione dei parametri geomorfologici ed idraulici utili al corretto funzionamento del modello.

In particolar modo tale raffittimento risulta prevalentemente concentrato nelle zone delle bocche di porto e in quelle limitrofe influenzate dalla loro presenza, in quanto l'osservazione degli effetti dovuti alle loro recenti modifiche sono il principale oggetto di studio del presente elaborato.

Per il conseguimento di tale obiettivo si rende necessario l'impiego di *due griglie computazionali*. Queste differiscono nella rappresentazione delle bocche di porto, rispettivamente nelle configurazioni antecedenti e successive ai lavori del Mo.S.E., iniziati nel 2003, dopo l'approvazione del progetto definitivo da parte del Magistrato delle Acque in data 8 novembre 2002 e conclusi (le opere fisse alle bocche) nel 2011.

2.4.1 Limiti del dominio

I limiti imposti al dominio per la formazione della griglia bidimensionale di studio sono stati scelti con diversi criteri per la parte interna della laguna e per la zona di mare esterna alle bocche di porto (fig. 2.5).

La superficie lagunare è infatti determinata da precisi limiti fisici:

- Le *superfici asciutte* dell'entroterra;
 - Le *valli da pesca arginate*, presenti sia nella parte centrale che in quella superiore della laguna;
 - I *cordoni litoranei* di separazione dal mare.
-

La scelta dell'estensione da attribuire alla porzione di mare esterna alle bocche di porto non si basa su specifici limiti fisici, quanto sulla soddisfazione di alcune necessità di natura modellistica.

La richiesta di un dominio quanto più esteso possibile che comprenda un'ampia fascia di mare antistante la laguna, consente di descrivere compiutamente l'idrodinamica nei paraggi delle bocche stesse, caratterizzata da importanti getti soprattutto nella fase di riflusso della marea. Questo aspetto è particolarmente importante nella configurazione post Mo.S.E., dove le opere risultano più protese verso il largo.

L'inserimento all'interno del modello delle opere fisse presenti nella configurazione post Mo.S.E. è di fondamentale importanza per soddisfare l'obiettivo primario di valutazione del loro effetto sulla propagazione delle maree sia nelle fasi di flusso che di riflusso.

L'impiego di un dominio eccessivamente esteso è però da evitare. La presenza di una singola stazione di misura esterna alla laguna (Piattaforma CNR) comporterebbe infatti l'attribuzione di una uniforme condizione al contorno (BC) lungo tutto il confine esterno, portando ad una non perfetta rappresentazione dell'evoluzione temporale dei livelli alle bocche di porto.

Per soddisfare tali considerazioni, non ritenendo necessaria ai fini dello studio l'estesa porzione di mare esterna alle bocche, la griglia computazionale utilizzata e fornita dal gruppo di Idraulica del DICEA, è stata ridotta come da fig. 2.4, rendendo di fatto ogni bocca indipendente dalle altre e riferita a una diversa stazione mareografica per l'attribuzione delle condizioni al contorno, rispettivamente Lido diga Sud, Malamocco diga Nord e Chioggia diga Sud.

In relazione all'errore prodotto sulla propagazione dalla non completa corrispondenza tra il punto di applicazione delle BC imposte ai limiti esterni delle bocche di porto e il punto di misura delle stesse, localizzato sui moli, questo può considerarsi trascurabile e in ogni caso minore rispetto a quello dato dall'attribuzione della singola condizione di Piattaforma CNR ai bordi del dominio esteso.

Essendo le dimensioni dei bracci di mare tra loro paragonabili, l'effetto su ritardo e modalità di propagazione dell'onda di marea può considerarsi di pari entità per le tre bocche di porto, non producendo effetti differenti nei rispettivi sottobacini di riferimento interni alla laguna (vedi Capitolo 5).

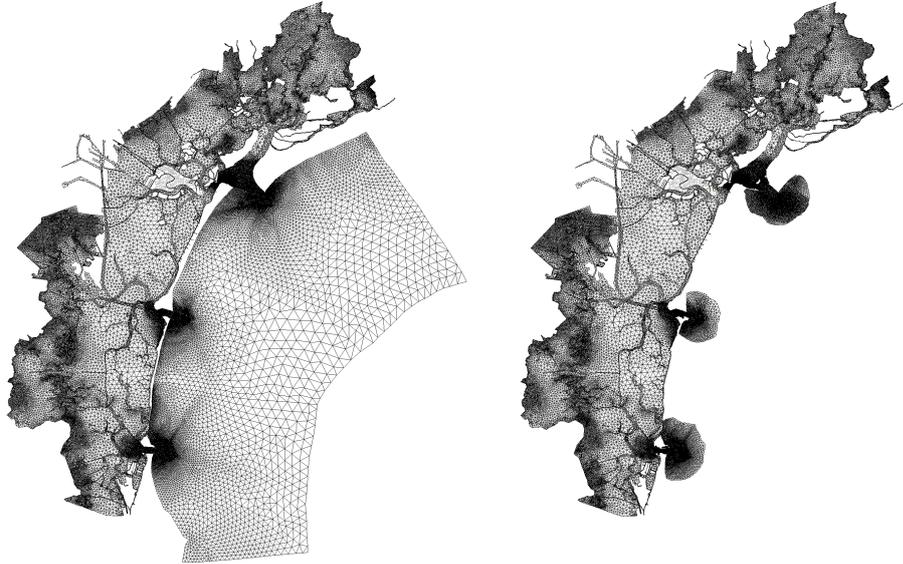


Figura 2.4: Riduzione della dimensione del dominio esterno alle bocche di porto della laguna di Venezia allo scopo di ridurre il ritardo di propagazione dovuto all'impiego della condizione al contorno uniforme legata alla stazione di Piattaforma CNR. Le BC vengono spostate dal largo alla zona immediatamente prossima alle bocche.

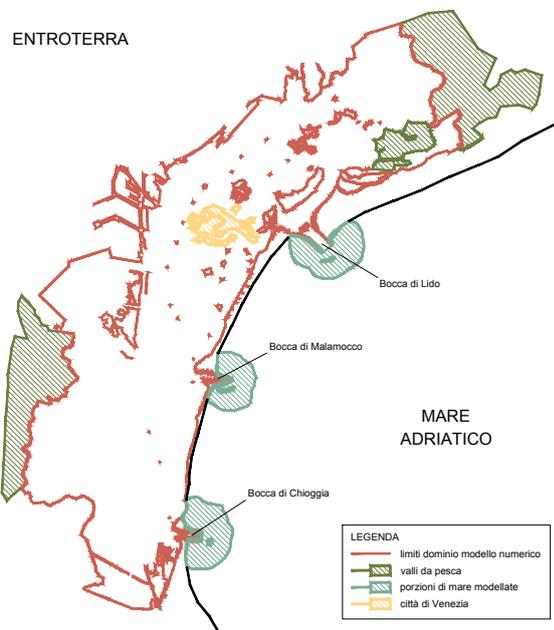


Figura 2.5: Limiti e parti fondamentali del dominio di riferimento per la modellazione numerica

2.4.2 Caratteristiche del reticolo di calcolo

La superficie interna alla laguna, non essendo interessata dalle modifiche alle bocche di porto se non indirettamente per gli effetti di natura idraulica, presenta la medesima configurazione in entrambi i casi di studio.

Tale considerazione è valida anche per l'esigua porzione di mare posta esternamente alle bocche di porto, oltre le opere fisse.

Il reticolo di calcolo presenta le seguenti particolarità:

- È formato da una griglia bidimensionale contenente all'incirca 112.000 maglie e 59.000 nodi, adeguatamente raffittita e modellata per poter descrivere in modo quanto più veritiero e accurato possibile non solo la rete di canali che ne costituisce il fondo, bensì anche la distribuzione delle zone di barena e di bassofondo che caratterizzano il paesaggio lagunare e delle isole che ne costellano la sua superficie (fig. 2.6a);

- Le isole non sono presenti nella griglia in quanto la loro modesta propensione ad essere interessate da fenomeni di allagamento non giustifica l'onere computazionale legato alla loro descrizione per mezzo di elementi bidimensionali.

Tale considerazione è valida anche per la città di Venezia dove, come riportato in sezione 2.5, solamente la complessa rete dei canali è stata riprodotta tramite l'uso di elementi 1D, con lo scopo di ottenere una corretta descrizione delle modalità di propagazione della marea per il calcolo delle velocità di deflusso all'interno dei rii.

Tale comportamento non è stato emulato nelle altre isole maggiori;

- I parametri di K_S , h_f e a_r attribuiti agli elementi della mesh, rispettivamente pari a quota, profondità e microasperità del fondo (fig. 2.6b e 2.6c) derivano da accurate operazioni di rilievo e taratura svolte nell'ambito di studi precedenti.
-

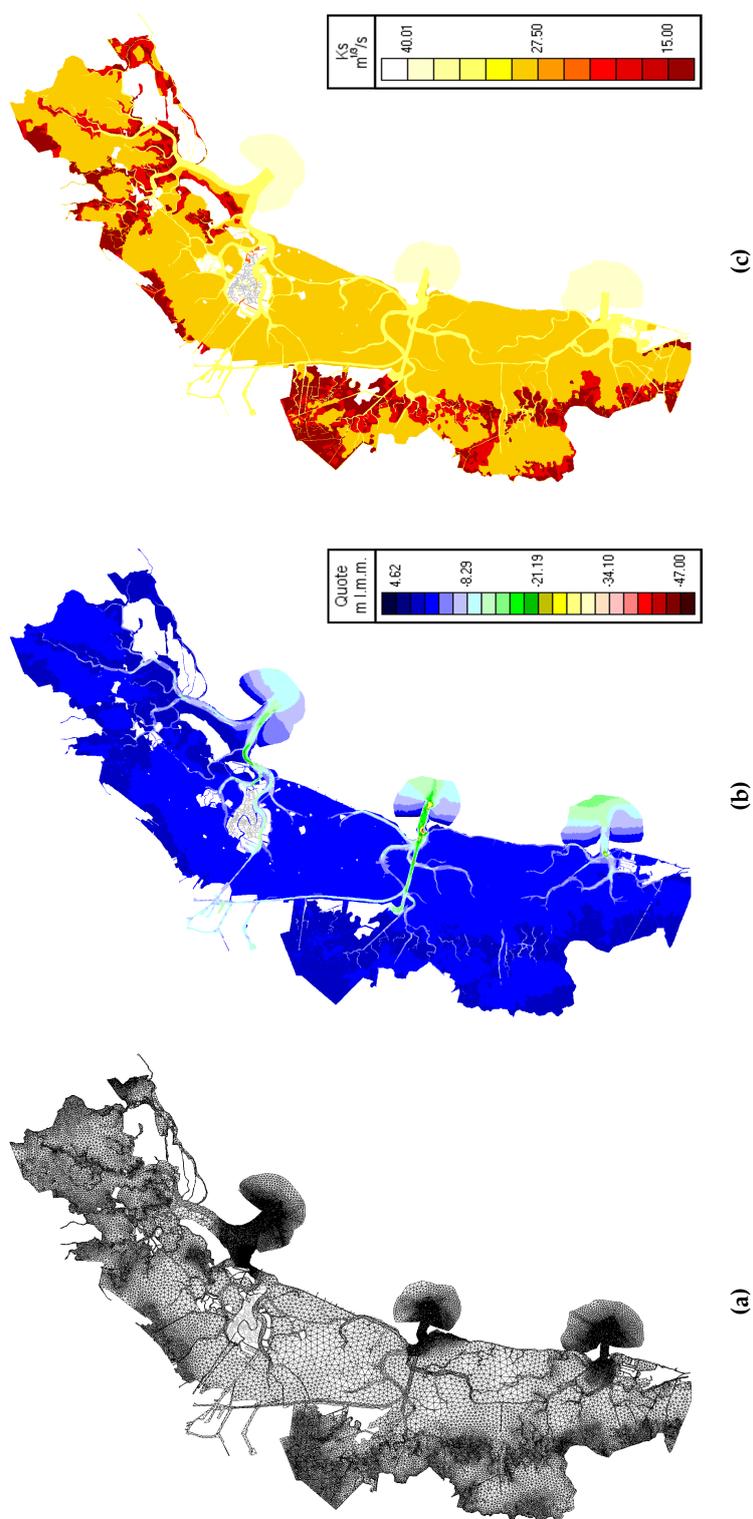


Figura 2.6: Griglia del modello uni-bidimensionale (a) adottato per la descrizione della laguna di Venezia, schematizzazione della batimetria (b) e della scabrezza al fondo (c). La distribuzione del parametro k_s , non è stata riportata in quanto uniformemente posto pari a 0.30

2.4.2.1 Schematizzazione delle bocche di porto

Gli interventi svolti alle bocche di porto della laguna, utili all'installazione delle paratoie mobili previste nel progetto definitivo del Mo.S.E., hanno prodotto una forte modifica della loro configurazione geometrica e batimetrica, con conseguenti effetti sul loro comportamento dal punto di vista idraulico.

L'analisi di tali effetti richiede necessariamente l'impiego di due reticoli di calcolo, differenti per l'appunto nella schematizzazione delle bocche.

Lido

La bocca di porto di Lido è stata rimodellata sulla base delle seguenti modifiche previste dal progetto Mo.S.E.:

- Inserimento dell'isolotto centrale alla bocca, avente superficie pari a circa 9 ettari, con lo scopo di dividere i due canali principali in ingresso alla laguna e supportare le due file di paratoie aventi uno sviluppo pari a 420 m quella posizionata sul canale di Treporti e 400 m quella sul canale di San Nicolò, necessariamente separate vista la diversa profondità dei due fondali;
- Ampliamento della zona asciutta interessata dal litorale di Treporti, posto sul lato nord della bocca, con l'inserimento del porto rifugio utile al transito e al ricovero delle imbarcazioni qualora le paratoie siano in funzione. Non è stato ritenuto utile inserire la conca di navigazione a collegamento dei due bacini del porto;
- Ampliamento del molo esistente lungo il litorale di San Nicolò, posto sul lato sud della bocca;
- Inserimento della scogliera curvilinea con sviluppo di circa un chilometro posta all'esterno della bocca.

Tali modifiche oltre al sostegno delle paratoie, hanno ufficialmente anche come scopo l'incremento della resistenza nei confronti del deflusso idrico.

L'attribuzione del parametro K_S sarà trattata in modo specifico nel Capitolo 5.

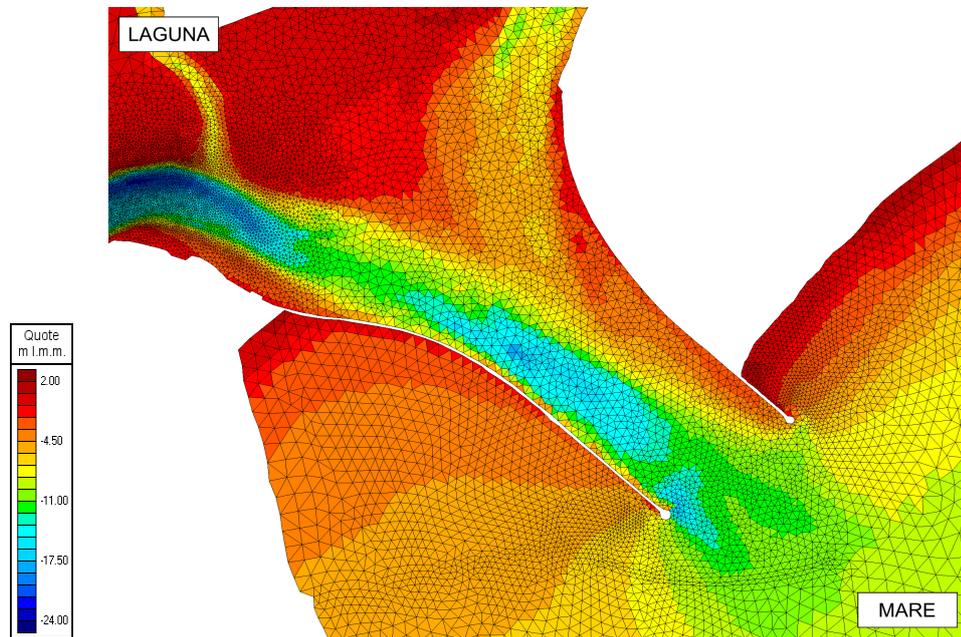


Figura 2.7: Configurazione ante-Mo.S.E. della bocca di porto di Lido (2003) - distribuzione delle quote del fondo h_f [m s.l.m.m]

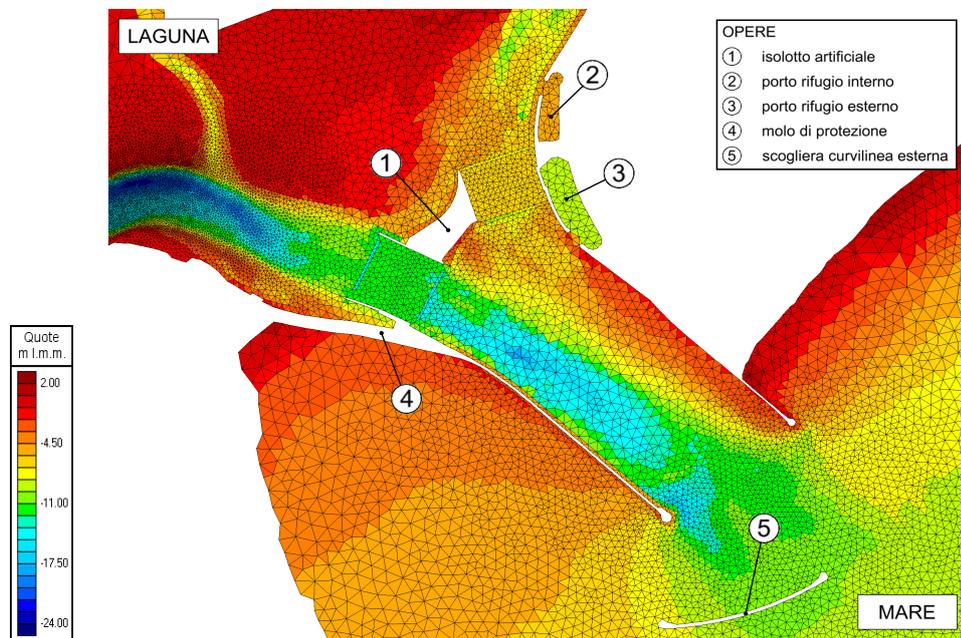


Figura 2.8: Configurazione post-Mo.S.E. della bocca di porto di Lido (2012) - distribuzione delle quote del fondo h_f [m s.l.m.m]

Malamocco

La bocca di porto di Malamocco, oltre ad essere la più profonda della laguna con i suoi - 14 m *s.l.m.m.* di quota del fondo, è stata interessata da forti modifiche, utili a permettere il passaggio delle grandi navi in transito verso il porto commerciale di Marghera durante le fasi di operatività del sistema di paratoie.

In particolare gli interventi inseriti nel modello sono:

- Ampliamento della superficie asciutta dell'isola di Pellestrina, posta sulla sponda sud della bocca di porto, per la realizzazione di una conca di navigazione, le cui notevoli dimensioni (380 m in lunghezza per 50 m in larghezza) consentono l'alloggiamento non solo delle navi maggiori, bensì anche dei rimorchiatori di appoggio. Anche in questo caso non è stato ritenuto utile l'inserimento in modello della conca di navigazione a collegamento dei due bacini;
- Inserimento di una scogliera curvilinea esterna alla bocca di porto e collegata alla sponda sud, avente lunghezza pari a circa 1280 m, allo scopo di schermare la conca di navigazione dall'effetto delle mareggiate esterne, fungendo dunque anche da rifugio per le navi in ingresso e uscita dalla laguna.
Per permettere il transito alle navi di maggiore dimensione, il bacino formato dalla presente scogliera è stato necessariamente assoggettato ad un approfondimento del fondale;
- Creazione delle spalle di appoggio dei cassoni, utili a consentire l'ingresso nelle gallerie alloggiate al loro interno;
- Variazione delle quote del fondo nella parte interna alla bocca, a causa delle opere di consolidamento e livellamento per il posizionamento dei cassoni delle paratoie mobili.

L'insieme dei lavori comporta la riduzione della larghezza della bocca da 450 a 375 m nel suo punto più stretto, con conseguente ed incremento delle velocità di deflusso.

Anche in questo caso l'aspetto legato alla variazione del parametro di scabrezza al fondo K_S sarà trattato nel dettaglio nel Capitolo 5.

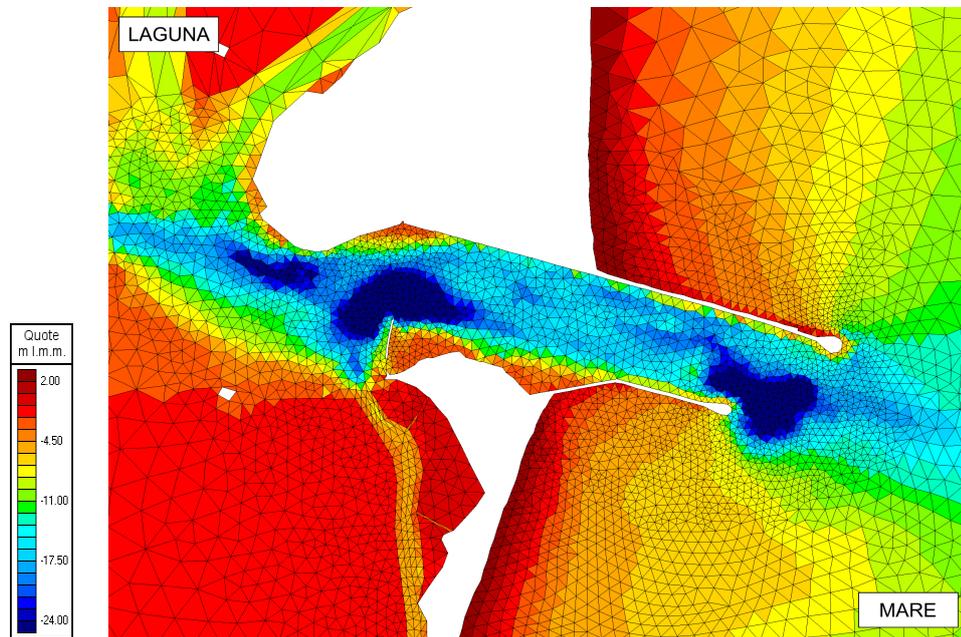


Figura 2.9: Configurazione ante-Mo.S.E. della bocca di porto di Malamocco (2003) - distribuzione delle quote del fondo h_f [m s.l.m.m]

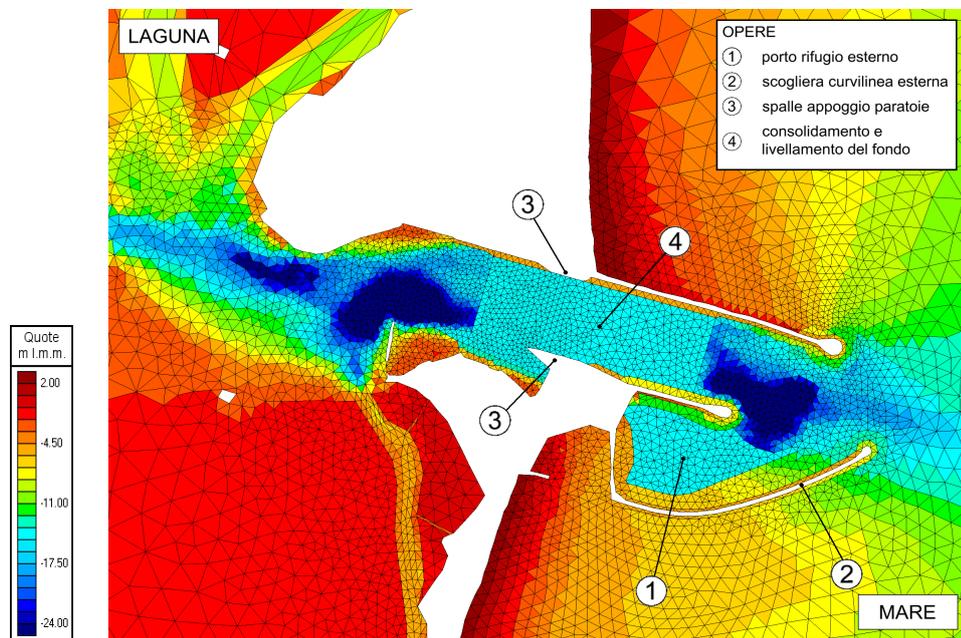


Figura 2.10: Configurazione post-Mo.S.E. della bocca di porto di Malamocco (2012) - distribuzione delle quote del fondo h_f [m s.l.m.m]

Chioggia

La bocca di porto di Chioggia presenta una serie di variazioni alquanto intense, in relazione all'intenso flusso di natanti da pesca e da diporto che la interessano, vista la prossimità con il centro balneare di Sottomarina e con la città di Chioggia.

Gli interventi riportati nel modello sono:

- Riassetto della sponda nord della bocca di porto, posta sul litorale di Pellestrina, con l'inserimento di due porti rifugio a servizio della doppia conca di navigazione utili allo smaltimento dell'intenso traffico di imbarcazioni minori, nel caso di entrata in esercizio delle paratoie. Le dimensioni dei due porti rifugio corrispondono a 8 ettari lato mare e 4 ettari lato laguna. Essendo destinati al passaggio di imbarcazioni di stazza e pescaggio ridotto, la profondità del fondale non è stata eccessivamente accresciuta. Anche in questo caso si è deciso di non schematizzare le due conche di navigazione presenti;
- Riduzione della larghezza della bocca da 485 a 360 m nel suo punto più stretto, a causa dell'inserimento delle opere di alloggiamento delle paratoie mobili e del sistema di collegamento dei porti rifugio, con conseguente variazione delle velocità all'interno della bocca;
- Inserimento della scogliera di lunghezza 520 m posta sul lato mare per lo smorzamento delle mareggiate di maggiore entità, a protezione delle opere interne alla bocca;
- Variazione delle caratteristiche del fondo nella zona di posizionamento delle paratoie, come conseguenza delle operazioni di livellamento e consolidamento del fondale.

In conformità alle precedenti bocche, anche in quest'ultimo caso l'aspetto legato alla variazione del parametro di scabrezza al fondo K_S sarà trattato nel dettaglio nel Capitolo 5.

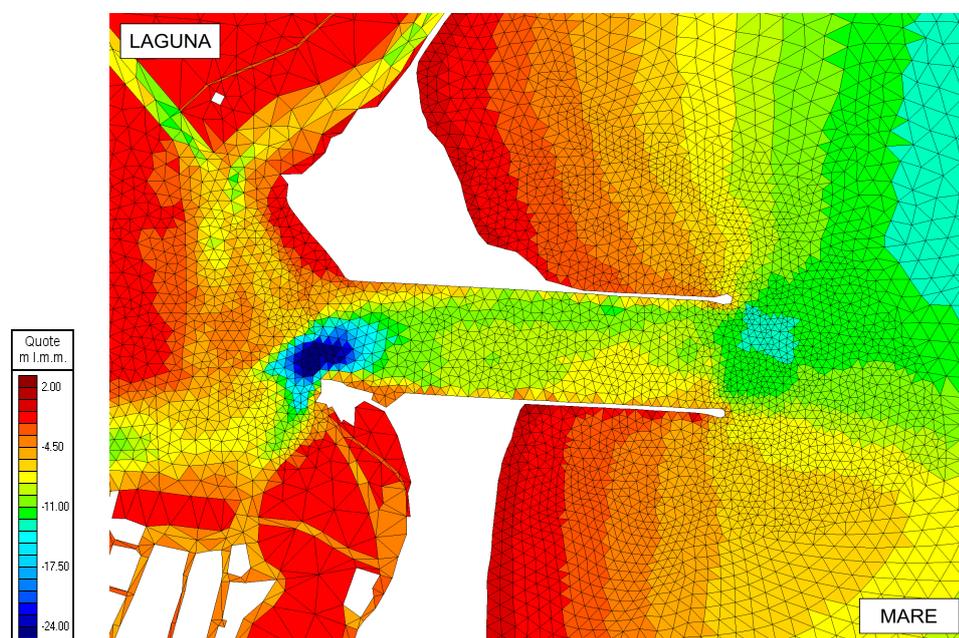


Figura 2.11: Configurazione ante-Mo.S.E. della bocca di porto di Chioggia (2003) - distribuzione delle quote del fondo h_f [m s.l.m.m]

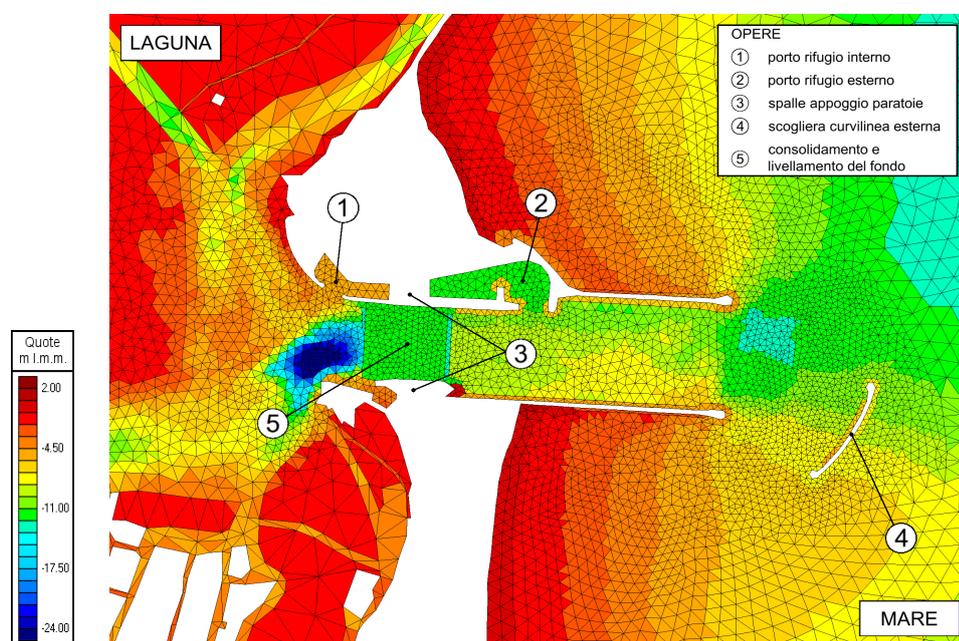


Figura 2.12: Configurazione post-Mo.S.E. della bocca di porto di Chioggia (2012) - distribuzione delle quote del fondo h_f [m s.l.m.m]

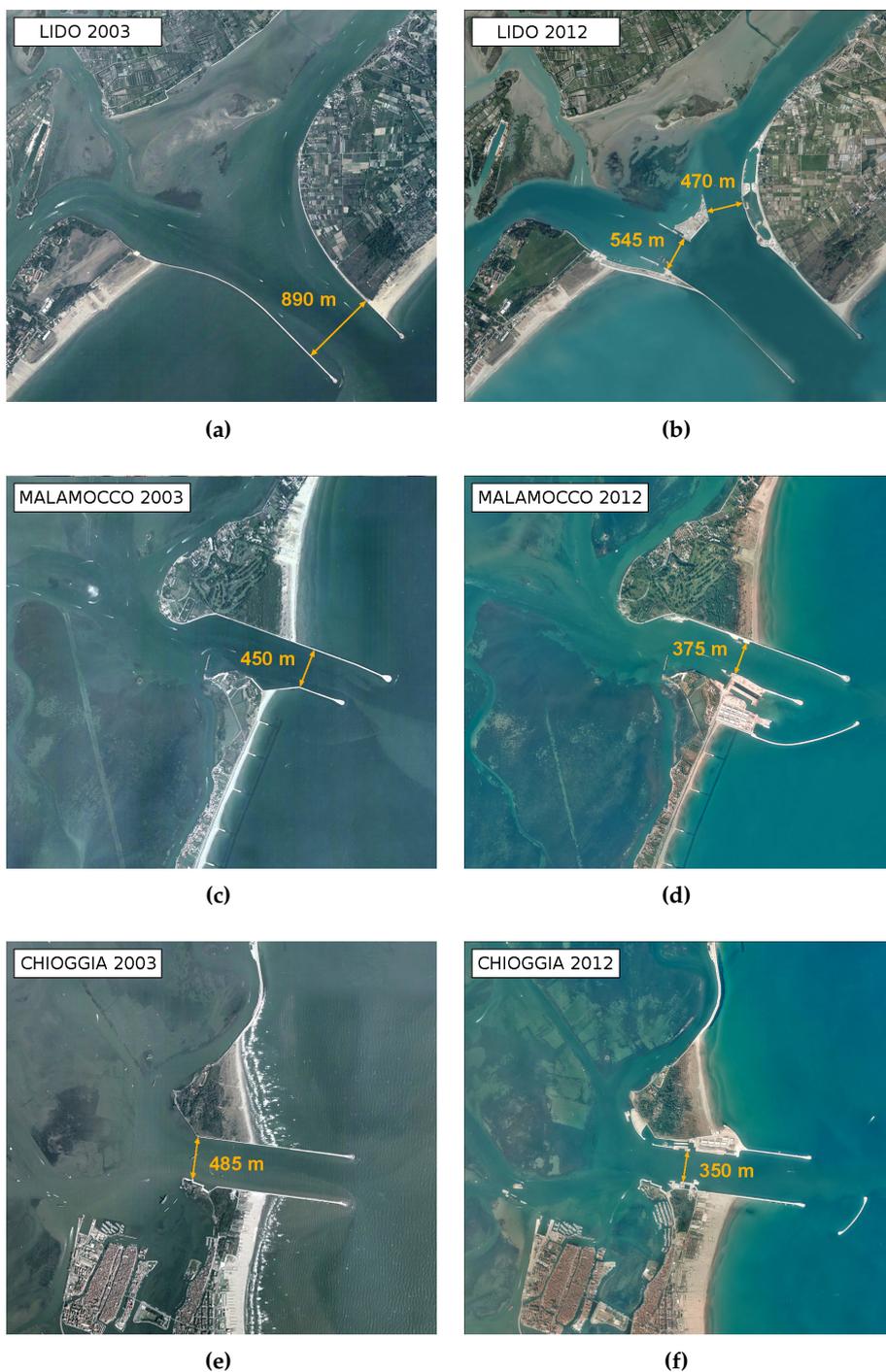


Figura 2.13: Restringimento delle bocche di porto della laguna di Venezia dovuta alla realizzazione del Mo.S.E. (foto aeree georeferenziate tratte dal GeoPortale Nazionale del Ministero dell’Ambiente <http://www.pcn.minambiente.it/GN/>).

2.5 La rete dei canali di Venezia

La città di Venezia è situata nella parte centro settentrionale dell'omonima laguna ed è formata da circa un centinaio di isole circondate da una complessa rete di 158 canali navigabili noti come *rii*. Occupando all'incirca il 10% della superficie cittadina per uno sviluppo complessivo in lunghezza pari a circa 40 km, la loro funzione è paragonabile a quella della rete stradale di una qualsiasi città dell'entroterra.

Preponderante tra questi, sia dal punto di vista dimensionale che funzionale è il Canal Grande, situato nella parte centrale della città. Il suo collegamento alla laguna circostante viene garantito dall'intricata rete di canali interni di cui ne costituisce la "spina dorsale".

Tale collegamento sta alla base dell'intero funzionamento idrodinamico della rete, il cui deflusso viene fondamentalmente governato dai seppur piccoli gradienti di livello presenti tra le varie parti della città, dovuti al fenomeno di propagazione delle maree.

Altri parametri che influenzano il comportamento idraulico dei canali sono gli effetti della navigazione e le condizioni atmosferiche locali, sintetizzabili queste ultime nelle componenti di pressione atmosferica e vento.

2.5.1 Modello della rete

La rappresentazione del reticolo di canali (*rii*) interi alla città di Venezia è stata svolta per mezzo di elementi monodimensionali, opportunamente collegati alla rete bidimensionale esterna, che ne costituisce la base d'appoggio sia dal punto di vista geometrico che numerico.

La rete, descritta graficamente in fig. 2.14, formata da 347 nodi e 455 canali, è stata completamente rivisitata e ampliata rispetto a quella impiegata da precedenti Autori (Defina et al., 1995; Umgiesser et al., 2001).

In particolare:

- Le posizioni, le larghezze e le profondità dell'intero sistema di canali sono state rivalutate sulla base dei dati raccolti nei rilievi svolti nei primi anni del 2000 da *Insula S.p.a.* (fig. 2.15 e 2.16);
 - La dimensione della rete è stata incrementata inserendo al suo interno anche i cosiddetti *rii terà* (fig. 2.14 in rosso), soggetti cioè a tombamen-
-

to per aumentare la superficie edificabile della città.

Essendo nota solamente la quota del fondo sono stati considerati come canali a pelo libero, trascurando gli effetti dovuti al loro funzionamento in pressione.

La sezione scelta per descrivere i canali del modello monodimensionale è quella trapezia con scarpa nulla.

Tale scelta è preferibile in primo luogo per rendere uniforme la loro descrizione all'interno del modello, in quanto non tutti i canali presentano sezione rettangolare; in secondo luogo per garantire una maggiore versatilità nella modifica della geometria dei canali nel caso di possibili future variazioni che possano interessarli.

Nel nostro caso solamente il Rio di S. Elena (fig. 2.14 in verde) presenta una sezione trapezia con scarpa unitaria.

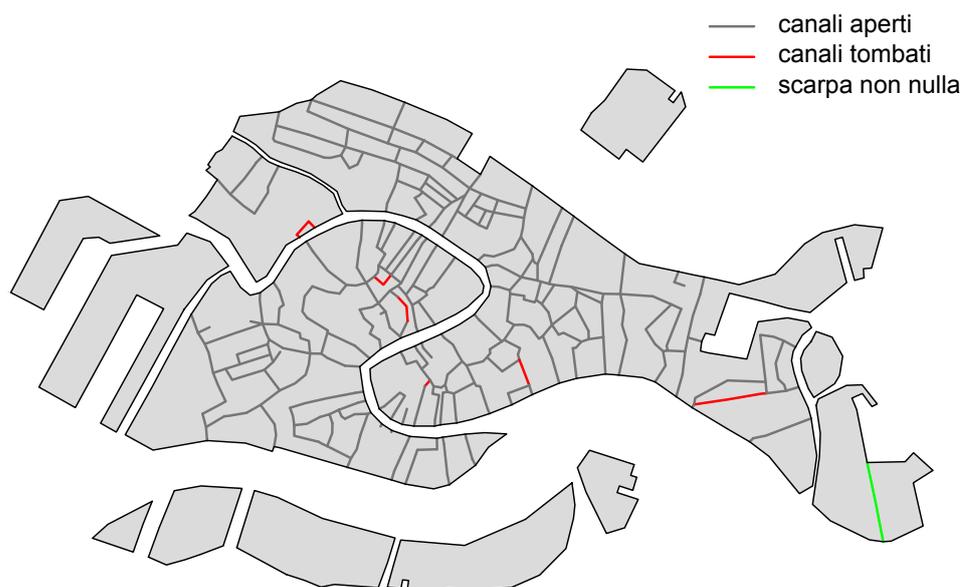


Figura 2.14: Schema della rete 1D dei canali della città.

Seppur i canali in rosso siano tombati nella realtà, non essendo nota la quota della sommità del canale, si è preferito considerare un funzionamento a pelo libero nello svolgimento delle simulazioni.



Figura 2.15: Distribuzione quote del fondo rete iniziale [m s.l.m.m.]



Figura 2.16: Distribuzione quote del fondo rete modificata [m s.l.m.m.]

Capitolo 3

Metodi e strumenti

3.1 Misure di Livello

3.1.1 La rete Meteo-Mareografica

Il monitoraggio della laguna di Venezia avviene per mezzo di 52 stazioni meteo-mareografiche gestite da ISPRA, Servizio Laguna di Venezia (SLV) e distribuite all'interno del bacino lagunare e lungo il litorale dell'Adriatico, ognuna opportunamente attrezzata con apparecchiature conformi agli standard internazionali.

La rilevazione del livello di marea avviene localmente, con registrazione su supporto informatico e successiva trasmissione in tempo reale o differito (24 h) dei dati forniti al SLV, attraverso sistemi di trasmissione in ponte radio o GSM, di cui quasi la metà delle stazioni è dotata.

Alcune stazioni sono inoltre attrezzate per la rilevazione di altri parametri, quali direzione e velocità del vento, pressione atmosferica, precipitazione, temperatura dell'aria, umidità relativa, radiazione solare e moto ondoso lagunare.

Le centrali del SLV sono strutturate per poter scambiare in tempo reale con le corrispettive centrali delle regioni Veneto e Friuli Venezia Giulia i dati raccolti. Tali dati sono inoltre impiegati per la redazione e successiva divulgazione del Bollettino Giornaliero della Marea e per la previsione di eventi estremi.

3.1.2 Le stazioni di misura

Le stazioni di misura sono costituite per lo più da una cabina sorretta da pali di fondazione e circondata da briccole per consentire l'accosto di imbarcazioni utili alle operazioni di manutenzione, sopralluogo e monitoraggio.

Come già riportato ogni stazione è dotata di sistemi di misura del livello di marea:

- Una strumentazione montata su *supporto elettronico*, formata da un galleggiante collegato tramite un filo in tensione su di una puleggia, ad un mareografo vero e proprio;
- Una strumentazione complementare di natura *meccanica*, registrante su diagramma cartaceo (mareogramma), utile alla validazione dei dati ottenuti dalla strumentazione elettronica.

La misura viene svolta all'interno di un pozzetto di calma, munito di due fori di collegamento verso l'esterno, che permette lo smorzamento della maggior parte delle oscillazioni aventi minore periodo, conservando quelle a periodo maggiore, corrispondenti per l'appunto alle onde di marea.

Una sezione schematica descrivente una stazione mareografica è riportato in fig. 3.2. La loro distribuzione in laguna è riportata in fig. 3.1.

Le stazioni meteo-mareografiche sono completate da un sistema di misura dei parametri del vento, solitamente formato da un anemometro direzionale.

3.1.3 Le stazioni di riferimento

La scelta delle stazioni meteo-mareografiche di riferimento si basa sulla natura e sulle modalità di impiego dei dati da queste forniti:

- Attribuzione delle condizioni al contorno di livello (BCL);
- Attribuzione dei parametri descrittivi del vento (BCV);
- Confronto dei dati di livello (CDL);

Le loro funzioni sono riportate in Tab. 3.1.

Tabella 3.1: Elenco delle stazioni mareografiche considerate e loro funzione

Stazione	Localizzazione	Ente	BCL	BCV	CDL
Piattaforma CNR	Mare Adriatico	ICPSM			⊙
Lido Diga Sud	Laguna Nord	ISPRA	⊙		
Le Saline	Laguna Nord	ISPRA		⊙	
Grassabò	Laguna Nord	ISPRA			⊙
Burano	Laguna Nord	ISPRA			⊙
San Nicolò	Laguna Nord	ISPRA			⊙
Sant'Erasmus	Laguna Nord	ISPRA			⊙
Marghera	Laguna Nord	ISPRA			⊙
Punta della Salute	Laguna Nord	ISPRA			⊙
Malamocco Diga Nord	Laguna Centro	ISPRA	⊙		
Faro Rocchetta	Laguna Centro	ISPRA			⊙
Valle Averte	Laguna Centro	ISPRA			⊙
Fusina	Laguna Centro	ICPSM			⊙
Chioggia Diga Sud	Laguna Sud	ISPRA	⊙	⊙	
Chioggia Vigo	Laguna Sud	ISPRA			⊙

La scelta delle stazioni si basa sui seguenti criteri:

- Garantire la presenza di almeno una stazione di misura per ogni sottobacino la cui sezione di controllo corrisponda ad una bocca di porto, per garantire il controllo dei livelli all'interno di tutta la laguna;
- Attribuire una certa significatività e robustezza al confronto degli effetti sull'idrodinamica lagunare dati dalle modifiche apportate alle bocche di porto, considerando delle stazioni aventi disponibilità di dati misurati sia nel periodo successivo che precedente ai lavori di predisposizione del Mo.S.E.;
- Permettere un confronto con altri studi presenti in letteratura;
- Avere un maggior numero di stazioni per il monitoraggio della parte settentrionale della laguna, in corrispondenza alla città di Venezia, in quanto il comportamento dei flussi interni alla rete cittadina dei canali è alla base della presente tesi.



Figura 3.1: Localizzazione e funzioni delle stazioni meteo-mareografiche

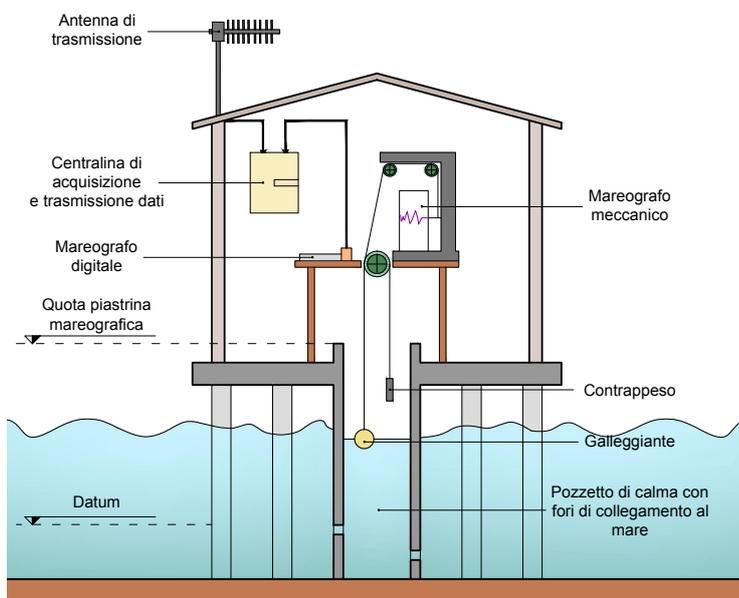


Figura 3.2: Sezione schematica di una stazione mareografica con galleggiante e pozzetto di calma

3.2 Misure di velocità

3.2.1 Strumenti

Le misure di velocità sono state svolte dal CNR su 12 rii della città, usando dei correntometri *InterOcean modello S4* (fig. 3.3).

Il loro posizionamento in corrispondenza dei ponti è ovviamente legato a ragioni pratiche di messa in opera degli stessi strumenti, oltre che alla mancata presenza di imbarcazioni ormeggiate sulle spalle o in prossimità degli stessi e il relativo controllo delle velocità delle imbarcazioni in transito sotto di essi, limitando dunque ogni possibile interferenza nelle operazioni di misura.

I dati ottenuti nelle misure, protrattesi dall'ottobre al dicembre del 2004, riguardano la direzione e l'intensità delle correnti agenti nei canali di riferimento.

La loro misura è data attraverso due coppie di elettrodi in titanio posizionati simmetricamente sull'equatore del sensore di forma sferica, che restituiscono il valore delle velocità di deflusso in cm/s e la loro direzione in gradi rispetto al Nord Magnetico.

Entrambi i parametri sono stati rilevati con una frequenza di acquisizione di 5 minuti. La loro rielaborazione è descritta in sottosezione 3.2.3.



Figura 3.3: Correntometro InterOcean modello S4

3.2.2 I canali di riferimento

La misurazione delle velocità è stata svolta su 12 rii, suddivisi in gruppi di 3, in quattro diverse posizioni della città, come indicato in fig. 3.4.

Le misure sono state svolte in quattro periodi differenti, per ognuno dei quali sono stati considerati tre rii. A seguito verranno indicati con i nomi dei sestrieri di appartenenza, per l'appunto San Polo, Santa Croce, Dorsoduro, Cannaregio e Castello.

Seppur la scelta di considerare tre rii per ogni zona sia dettata da necessità operative, in particolar modo dalla limitata disponibilità di strumenti di misura, la scelta di considerare canali appartenenti a zone diverse permette una più accurata analisi del comportamento dell'intera rete cittadina.

Le caratteristiche dei rii considerati, basate su rilievi batimetrici e dimensionali svolti da *Insula*, sono riportate in Tab. 3.2.

Tabella 3.2: Elenco dei Canali interessati dalle misure di velocità

Rio	Ponte	Sestriere*	Base [m]	h_f [m l.m.m.]
di San Giobbe	di San Giobbe	CN	5.00	- 1.19
de la Misericordia	del Gheto Novo	CN	18.81	- 1.13
di San Felice	Belli	CN	6.23	-1.48
de l'Arzere	di Insula	D	21.58	- 1.60
del Tentor	dei Guardiani	D	12.75	-1.21
di S. Margherita	Foscarini	D	11.69	- 1.33
de S. Zan Degolà	Savio	SC	8.33	- 1.22
di S.Maria M.D.	di S.Maria M.D.	SP	5.61	- 0.84
de le Becarie	de le Becarie	SP	4.52	- 1.18
de la Tana	de la Tana	CS	11.25	- 1.32
de S. Isepo	de S. Isepo	CS	8.06	- 1.06
dei Giardini	della Biennale	CS	15.40	- 1.73

*CN = Cannaregio, D = Dorsoduro, SC = Santa Croce, SP = San Polo, CS = Castello

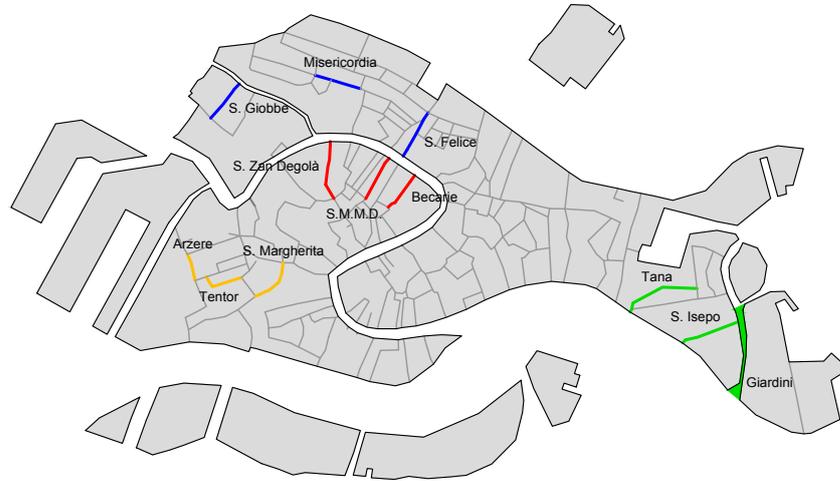


Figura 3.4: Localizzazione dei canali interessati dalle misure di velocità

3.2.3 Dati di velocità

I dati misurati dalla strumentazione presentano una precisione di 0.01 cm/s e un periodo di 5 minuti. Non essendo la direzione misurata pari a quella dell'asse del canale, questa è stata calcolata con la formula:

$$V_{asse} = V_i \cos \frac{2\pi(\theta_{asse} - \theta_i)}{360} \quad (3.1)$$

dove V_{asse} è la componente assiale della velocità della corrente, V_i è la velocità misurata nel momento i -esimo, θ_{asse} è la direzione dell'asse del canale di riferimento espressa in gradi nord e θ_i è la direzione della velocità i -esima espressa in gradi nord.

I risultati così ottenuti sono stati rielaborati applicandovi una *media mobile*, allo scopo di rimuovere una buona parte dei disturbi presenti all'interno del segnale. Il periodo di estensione scelto per lo svolgimento di tale operazione è pari a 2 ore.

Sebbene per la maggior parte dei canali la scelta di tale lunghezza per la finestra di media mobile possa ritenersi più che adeguata, lo stesso non può dirsi per il Rio di San Giobbe e il Rio de la Misericordia, dove la forte presenza di rumore richiederebbe un'analisi più attenta del segnale, basata sullo studio delle sue componenti armoniche. Il periodo di estensione adottato per questi due rii è pari a 5 ore.

3.3 Metodi di Taratura

Come già riportato al Capitolo 2, l'analisi delle variazioni del comportamento idrodinamico dei rii interni alla città di Venezia si basa sull'impiego di due diversi reticoli di calcolo, descrittivi le configurazioni Ante e Post Mo.S.E. della laguna, per lo svolgimento delle simulazioni utili a tale confronto.

Si ricorda come entrambi i reticoli siano stati messi a punto dai ricercatori del gruppo di Idraulica del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova.

Il reticolo descrittivo la configurazione precedente alle modifiche alle bocche di porto dovute al Mo.S.E. risulta già ampiamente calibrato e testato.

Lo stesso non può dirsi per il reticolo descrittivo la configurazione Post Mo.S.E., di più recente ultimazione, la cui taratura verrà affrontata in questo lavoro di tesi.

In modo particolare la taratura interesserà la zona in prossimità delle bocche di porto, attraverso la determinazione di un set di valori di scabrezza, potenzialmente diversa per la zona afferente ad ogni bocca, utile a descrivere l'effettiva variazione del comportamento delle bocche di porto. Questo in quanto, come mostrato in Ziggotto, 2013, la sola variazione della configurazione geometrica delle bocche tra i due reticoli, non è sufficiente a simulare gli effetti idrodinamici interni alla laguna, legati alle modifiche ad esse apportate.

La scabrezza attribuita alle bocche di porto e alle zone ad esse limitrofe nella configurazione Ante Mo.S.E. e nelle versioni precedenti al modello Post Mo.S.E. è pari a $35 m^{1/3}/s$.

Al fine di incrementare la precisione nel confronto delle variazioni presenti tra le due configurazioni, l'impiego delle ampiezze è da preferire all'utilizzo dei livelli. Questo in quanto, essendo ottenute come somma di livelli, le ampiezze presentano rispetto ad essi, uno scarto più apprezzabile tra i risultati ottenuti dalle due configurazioni di studio.

Per lo stesso motivo si farà inoltre riferimento solamente ai valori relativi ai massimi e minimi del segnale d'onda, dove l'effetto delle modifiche è maggiore.

3.3.1 Determinazione delle scabrezze alle bocche di porto

La scelta delle più appropriate scabrezze da attribuire alle bocche di porto del modello Post Mo.S.E. si basa sull'utilizzo dei dati di livello riferiti a 9 stazioni mareografiche distribuite all'interno della laguna di Venezia.

Il loro impiego prevede la valutazione di *ritardi di fase* e *ampiezze medie* dei segnali d'onda propagati in laguna, al fine di quantificare i parametri numerici più appropriati alla descrizione degli effetti dovuti alle modifiche apportate alle bocche di porto, riassunti proprio nelle scabrezze del fondo.

L'ottenimento di tali parametri si fonda su un procedimento di natura iterativa, la cui verifica finale prevede il confronto dei risultati calcolati con quelli disponibili in Letteratura (Matticchio et al., 2017), utilizzando un analogo metodo di valutazione (eq. 3.2 e 3.3).

Tali risultati sono stati ottenuti confrontando i valori delle variazioni percentuali di ampiezza e il ritardo di fase medi riferiti ai massimi e minimi del segnale d'onda calcolato con quelli relativi ai dati misurati nella stazione di Piattaforma CNR, esterna alla laguna.

Per ciascuna stazione l'ampiezza media e il ritardo di fase medio rispetto a Piattaforma CNR sono stati ottenuti utilizzando le formule seguenti:

$$A_{med} = \frac{1}{N_{max}} \sum_{i=1}^{N_{max}} H_i^{max} - \frac{1}{N_{min}} \sum_{j=1}^{N_{min}} H_j^{min} \quad (3.2)$$

$$R_{med} = \frac{1}{N_{max} + N_{min}} \left[\sum_{i=1}^{N_{max}} (T_j^{max} - T_{i,PT}^{max}) + \sum_{j=1}^{N_{min}} (T_i^{min} - T_{j,PT}^{min}) \right] \quad (3.3)$$

in cui N_{max} e N_{min} rappresentano il numero di estremali positivi e negativi (rispettivamente massimi e minimi di marea), H^{max} e H^{min} indicano il valore del livello in corrispondenza del singolo massimo e minimo di marea, mentre $(T_j^{max} - T_{i,PT}^{max})$ e $(T_i^{min} - T_{j,PT}^{min})$ individuano il ritardo con cui il singolo estremo si presenta nella singola stazione rispetto a quando si presenta nella Piattaforma CNR.

Essendo il numero delle stazioni di riferimento per le variazioni calcolate basso, ai fini della taratura si è deciso di adottare come riferimento i valori delle variazioni percentuali delle ampiezze e le variazioni dei ritardi per le componenti astronomiche, in quanto si è verificato essere del tutto paragonabili a quelle ottenute per i dati reali.

Il processo di attribuzione dei più corretti valori di scabrezza (K_S) nelle zone interessate dagli effetti delle singole bocche è di natura iterativa.

La zona interessata dalla scelta del più corretto valore di scabrezza è quella interna e nelle immediate prossimità delle bocche di porto, dove gli effetti delle loro modifiche tendono dunque ad essere maggiori.

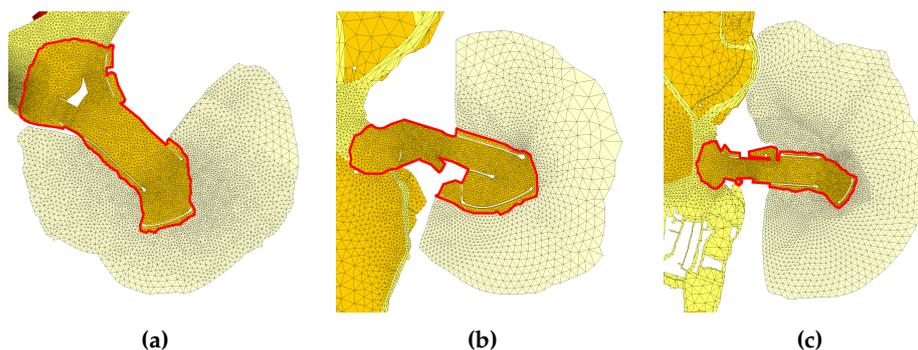


Figura 3.5: Zone interessate dalla taratura del parametro di scabrezza K_S (contorno rosso): a) Lido; b) Malamocco; c) Chioggia

Si ricorda come le modifiche apportate alle bocche di porto in seguito alla realizzazione delle opere del Mo.S.E. possono essere distinte in due tipologie: quelle in superficie e quelle al fondo.

Tra le *modifiche in superficie* si annoverano la realizzazione delle opere di difesa esterna, i nuovi moli, i porti rifugio con le rispettive conche di navigazione e le opere laterali di supporto delle paratoie a ventola, il cui inserimento in modello prevede la modifica della griglia computazionale nelle zone di interesse. Tali opere, oltre a godere di maggiore visibilità esterna, comportano la formazione di impedimenti ai flussi e di macrovortici, con conseguente aumento delle dissipazioni di energia.

Tra le *modifiche al fondo* quelle aventi maggiore impatto sono legate alla livellazione e alla consolidazione del fondale e all'inserimento delle paratoie meccaniche, il cui effetto viene tradotto in una modifica dei parametri di scabrezza del fondo, con conseguente variazione delle resistenze al moto.

Di importanza non trascurabile vi sono anche gli effetti indotti da entrambe le modifiche sulle zone limitrofe alle bocche, configurabili come una variazione delle quote e della granulometria del fondo, a causa degli effetti di trasporto solido conseguenti l'inserimento delle opere.

3.3.2 Metodo

Come già riportato, il metodo impiegato per la valutazione dei più corretti valori di K_S da applicare alle zone di influenza delle bocche di porto è di natura iterativa (fig. 3.6).

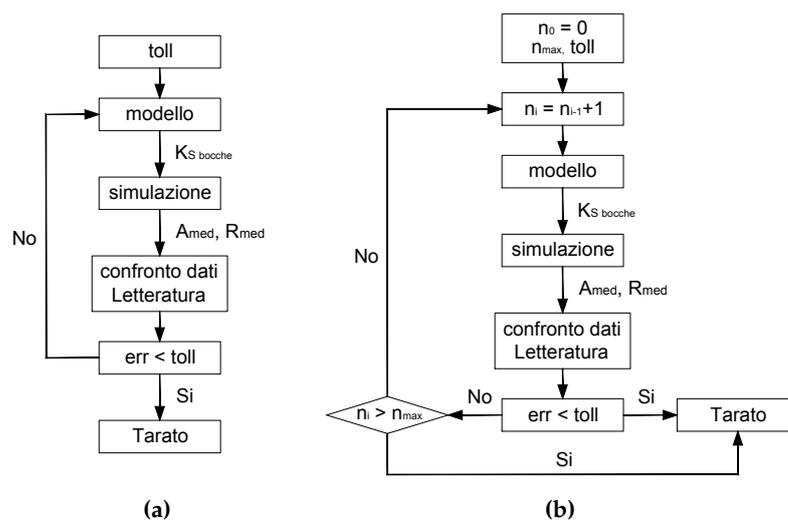


Figura 3.6: Procedimenti iterativi per la taratura dei K_S alle bocche di porto.
a) manuale; b) automatico con contatore

Il funzionamento si basa dunque sulla ricerca dell'ottimo nel calcolo di ritardi di fase e ampiezze medie, in rapporto ai valori di ottenuti dall'analisi dei dati (Matticchio et al., 2017).

Vista la considerevole mole di dati da analizzare e la non trascurabile durata delle simulazioni, l'impiego di un processo iterativo a cascata autoregolato è stato scartato a priori, in quanto l'inserimento di un contatore per la limitazione del numero di iterazioni da svolgere non avrebbe assicurato la possibilità di raggiungere in tempi brevi l'ottimo in termini di risultati, in modo indipendente dall'ammontare della limitazione imposta al numero massimo di iterazioni.

La valutazione qualitativa dei risultati e la modifica dei parametri di scabrezza è stata dunque svolta "manualmente" per ogni singola simulazione (fig. 3.6a).

Non è comunque da scartare una futura implementazione di tale procedimento automatico (fig. 3.6b).

3.3.3 Scabrezza dei rii

L'analisi di sensibilità sui canali di Venezia è stata condotta sull'intera rete, prendendo come riferimento il modello Ante Mo.S.E., in quanto i dati di velocità sono stati rilevati durante questo periodo.

I set di scabrezze utilizzati per la valutazione degli effetti sulle velocità di deflusso nei canali interni alla città sono:

- Scabrezza uniforme: $K_S = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- Scabrezza uniforme: $K_S = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- Scabrezza uniforme: $K_S = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- Scabrezza uniforme: $K_S = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;

L'impiego di un valore uniforme su tutta la rete sta alla base del processo di ricerca del parametro di scabrezza più adeguato a rappresentare il reale comportamento per ogni specifica zona.

Tale parametro viene individuato tramite il confronto tra i dati ottenuti dal modello e quelli misurati in loco nei 12 canali distribuiti all'interno del territorio cittadino, come indicato in sottosezione 3.3.2.

Una volta individuato tale valore, sarà attribuito alla specifica zona di afferenza e utilizzato per una ulteriore simulazione, allo scopo di verificare l'ammontare dell'interdipendenza tra i canali nel loro comportamento idrodinamico e di valutare se la differenziazione dei parametri di scabrezza comporti o meno il miglioramento dei risultati ottenuti dalle simulazioni.

Parametri statistici di riferimento

Per la valutazione della capacità rappresentativa dei modelli utilizzati si è fatto riferimento ad un metodo di confronto basato sui valori di media, varianza e correlazione, già utilizzato da precedenti autori (Coraci et al., 2007) con riferimento alla rete dei canali della città di Venezia.

La formula utilizzata è la seguente:

$$SSD = N\bar{d}^2 + N(s_{obs} - s_{mod})^2 + 2N(1 - r)s_{obs}s_{mod} \quad (3.4)$$

Il metodo si basa sulla scomposizione dello *Squared Prediction Error* (SSD), un estimatore statistico della capacità previsionale e di modellazione (potere esplicativo) di un dato algoritmo, in tre componenti.

Le componenti corrispondono all'*accuratezza* (errore), alla *precisione* (differenza delle varianze) e al *grado di associazione* (differenza della correlazione da 1). N è il numero degli elementi del campione, d è la media degli errori di previsione d_i , definiti come $d_i = y_i^{obs} - y_i^{mod}$, $i = 1, \dots, N$, s_{obs} e s_{mod} sono le deviazioni standard dei valori y_i^{obs} e y_i^{mod} , e r è il coefficiente di correlazione tra i due dataset.

I parametri statistici sono riportati in un *diagramma di Taylor*.

Formato su di un quadrante circolare, tale diagramma permette di esprimere la relazione tra il valore della correlazione, data come coordinata azimutale, e il valore della varianza dei dati modellati, per semplicità normalizzata su quella dei dati misurati, riportata su ascissa e ordinata e indicata come la distanza radiale rispetto all'origine.

La differenza tra il raggio vettore indicante il dataset considerato e il valore unitario cresce all'aumentare delle differenze in fase e ampiezza rispetto ai dati misurati.

L'impiego di questo metodo permette però di considerare l'effetto dei soli parametri di correlazione e varianza.

Il parametro di errore sarà considerato unicamente nel calcolo di SSD.

In particolare:

- Maggiori valori di SSD saranno ottenuti dai dataset che si riferiscono ad un periodo di maggiore estensione vista la maggior dimensione del parametro N , presente in tutti gli addendi della sommatoria;
- Sebbene il parametro di K_S ottimale sia riferito al dataset che minimizza il valore di SSD, volendo attribuire una singola scabrezza a zone comprendenti più canali, tale valore e quello scelto come ottimo potrebbero non corrispondere.

La mancata considerazione del parametro SSD nella determinazione di K_S ottimale è dunque legata alla volontà di dare maggior peso ai valori di correlazione e varianza, influenzate più dalle variazioni di fase e forma dei segnali di velocità che dalle variazioni delle loro intensità.

3.4 Metodi di Verifica

La verifica dei risultati ottenuti con la procedura di calibrazione è stata condotta tramite il confronto dei dati di livello calcolati con quelli osservati nelle molteplici stazioni di riferimento presenti nel bacino della laguna di Venezia.

Un confronto di natura puramente visiva non sarebbe però sufficiente per dare una valutazione sul corretto comportamento del modello e sulla sua capacità di simulare gli eventi considerati. Si è perciò deciso di stimare la sua efficienza per mezzo dei seguenti parametri statistici.

3.4.1 Nash-Sutcliffe Model Efficiency (ME)

Il metodo viene utilizzato per verificare la capacità previsionale dei modelli considerati in funzione del rapporto tra l'errore del modello e la variabilità dei dati osservati.

Il parametro di valutazione ME viene definito come la differenza tra le prestazioni di un modello perfetto (l'unità) e le prestazioni di un modello in relazione alle variazioni osservate.

$$ME = 1 - \frac{\sum_i (d - m)^2}{\sum_i (d - D)^2} \quad (3.5)$$

dove d sono i dati misurati, m sono i corrispettivi dati stimati dal modello e D è la media dei dati misurati.

Il range di variabilità di ME è compreso tra $-\infty$ e 1.

Un'efficienza pari a $ME = 1$ fa riferimento ad una perfetta corrispondenza tra i dati osservati e quelli modellati.

Il caso in cui l'efficienza sia $ME = 0$ indica che i dati calcolati dal modello sono tanto accurati quanto la media dei dati osservati, sottolineando un comune range di variabilità.

Nel caso in cui sia $ME < 0$, il valore della varianza relativa ai dati calcolati supera quella dovuta ai dati misurati, indicando una sempre maggiore crescita dell'errore nella simulazione al diminuire del parametro di accuratezza.

Il modello è dunque tanto più accurato quanto più il parametro ME si avvicina all'unità.

La descrizione delle prestazioni dei modelli avviene suddividendo i risultati ottenuti nelle seguenti categorie:

- $ME > 0.65$: Eccellente;
- $ME = 0.65 \div 0.50$: Molto buona;
- $ME = 0.50 \div 0.20$: Buona;
- $ME < 0.20$: Scarsa.

Un problema non trascurabile di tale metodo si lega al fatto che la differenza tra valori misurati e calcolati viene posta al quadrato. Questo provoca una sovrastima delle prestazioni del modello nelle posizioni di picco del livello, e una sottostima in quelle dove tende ad annullarsi (Krause et al., 2005).

Essendo tali posizioni equamente distribuite, visto il comportamento sinusoidale del fenomeno misurato, tale effetto può considerarsi trascurabile, in quanto potenzialmente auto-compensato.

3.4.2 Percentage Model Bias (PB)

Il presente metodo viene utilizzato per valutare nuovamente la capacità previsionale del modello considerato, valutando la tendenza in media dei valori calcolati ad essere superiori o inferiori ai corrispettivi valori misurati, con conseguenti ripercussioni sul valore dell'errore.

La valutazione è data dal parametro PB, definito come il valore dell'errore normalizzato sui dati calcolati dal modello.

$$PB = \frac{\sum_i (d - m)}{\sum_i d} \cdot 100 \quad (3.6)$$

dove d sono i dati misurati e m sono i corrispettivi dati stimati dal modello.

Il range di variabilità di PB è compreso tra $-\infty$ e ∞ .

Il valore che indica l'ottima capacità previsionale del modello è $PB = 0.00$.

Valori positivi di PB indicano una sottostima dei valori calcolati rispetto ai misurati e dunque del parametro di errore, mentre valori negativi indicano una sovrastima di questi valori.

Le categorie predisposte per la corretta valutazione della bontà dei risultati ottenuti sono:

- $PB < 10$: Eccellente;
 - $PB = 10 \div 20$: Molto buona;
 - $PB = 20 \div 40$: Buona;
 - $PB > 40$: Scarsa.
-

Capitolo 4

Periodi considerati e Condizioni al Contorno

4.1 Descrizione dei periodi

Sono a seguito descritte le caratteristiche dei periodi di riferimento e delle condizioni al contorno utilizzate per lo svolgimento delle simulazioni utili al raggiungimento degli obiettivi prefissati nel presente lavoro di tesi.

Per i periodi in cui non sono presenti dei rilievi associati sono riportati:

- L'estensione temporale della simulazione nel periodo di riferimento;
- Le condizioni al contorno imposte sul confine del dominio esterno alle bocche di porto;
- Le caratteristiche del vento in termini di intensità e direzione;
- I parametri forniti da file *.sim* per la caratterizzazione delle simulazioni.

Per i periodi in cui sono presenti i rilievi di velocità nei canali sono riportati anche:

- L'estensione temporale del periodo di svolgimento dei rilievi;
- Le caratteristiche dei canali interessati dai rilievi.

4.1.1 Periodo Verifica modello Ante Mo.S.E.

La verifica del modello Ante Mo.S.E. è basata sul periodo compreso tra le ore 00:00 del 07/12/2004 e le ore 23:50 dell'11/12/2004.

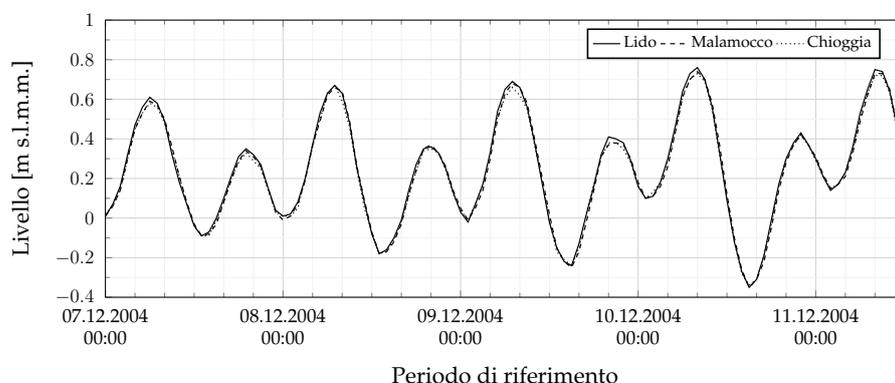
La scelta di tale periodo è anche in questo caso legata alla presenza di fluttuazioni apprezzabili della marea, che permettono di apprezzare al meglio l'errore commesso dal programma nel calcolo dell'idrodinamica della laguna, attraverso l'attenta analisi dei massimi e minimi, dove il divario tra valori calcolati e misurati è più accentuato. Essendo l'ultimo quarto formatosi il 05/12 e il novilunio il 12/12 il periodo non è di piena sizigia.

L'impiego di un periodo di riferimento quasi del tutto corrispondente a quello di svolgimento dei rilievi di velocità nei rii interni alla città (vedi sottosezione 4.1.6) non è strettamente necessario, ma permette una seppur minima ottimizzazione delle tempistiche, evitando la ricerca di ulteriori dati di inizializzazione del programma e confronto dei risultati. La riduzione a soli cinque giorni è necessaria per una corretta comparazione dei risultati ottenuti dalla verifica nella configurazione Post Mo.S.E..

Le condizioni al contorno imposte corrispondono ai dati di livello misurati nel periodo di riferimento dalle stazioni mareografiche di Lido diga Sud, Malamocco diga Nord e Chioggia diga Sud.

Si nota come i livelli siano tra loro prossimi in tutto il periodo di riferimento (fig. 4.1). L'impiego di condizioni differenti ad ogni bocca si rende comunque necessario per poter avvicinare quanto più possibile il modello al reale comportamento dei fenomeni studiati.

Figura 4.1: Condizioni al contorno imposte al largo



Il loro punto di applicazione coincide con il confine al largo del braccio di mare esterno a ciascuna bocca interessato dalla modellazione tramite griglia bidimensionale.

Si ricorda come non essendo questa posizione coincidente con il punto di misurazione dei livelli, questo comporta la formazione di un debole ritardo sui dati calcolati dal modello in tutto il dominio, il quale può essere tuttavia trascurato.

Figura 4.2: Intensità del vento misurate

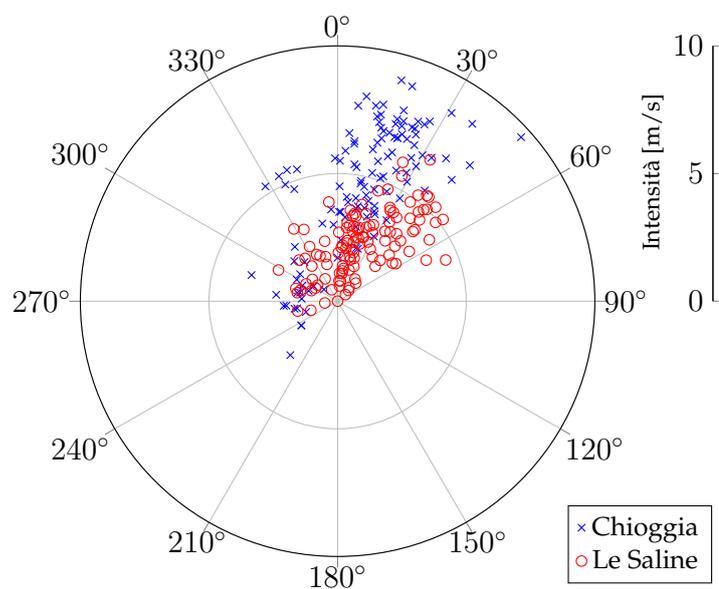
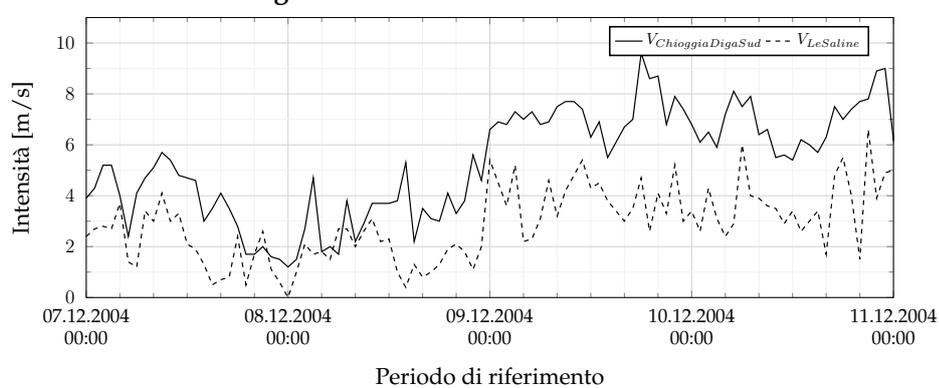


Figura 4.3: Diagramma polare Intensità - Direzione

La scelta del periodo è subordinata alla presenza di un vento la cui intensità, e di conseguenza i suoi effetti sulle velocità e i livelli presenti in laguna, non siano eccessivi.

Questa considerazione può ritenersi soddisfatta qualora l'intensità del vento non superi i 10 *m/s*.

I grafici riportati in fig. 4.2 e 4.3 dimostrano come in tutto il periodo di riferimento questa richiesta sia adeguatamente soddisfatta.

I parametri forniti al modello dal file *.sim* per la corretta caratterizzazione della simulazione sono:

- *TT* - Durata simulazione: 430200 [s]
 - *dt* - Passo temporale di calcolo: 5 [s]
 - *dtpr* - passo temporale stampa: 600 [s]
 - *H₀* - Quota superficie libera iniziale: + 0.01 [m s.l.m.m.]
 - Intervallo attribuzione dei valori di livello: 3600 [s]
-

4.1.2 Periodo Taratura - Verifica modello Post Mo.S.E.

La taratura del modello Post Mo.S.E. e la successiva verifica delle sue capacità di calcolo è svolta sul periodo compreso tra le ore 00:00 del 18/08/2012 e le ore 23:50 del 22/08/2012.

La scelta di questo periodo si basa sull'elevata ampiezza delle mareggiate che lo caratterizzano. Essendo *luna nuova* il 18/08, il periodo risulta dunque quasi in piena fase di *sizigia*.

Tali condizioni permettono di massimizzare l'efficienza della taratura, basata proprio sulle ampiezze.

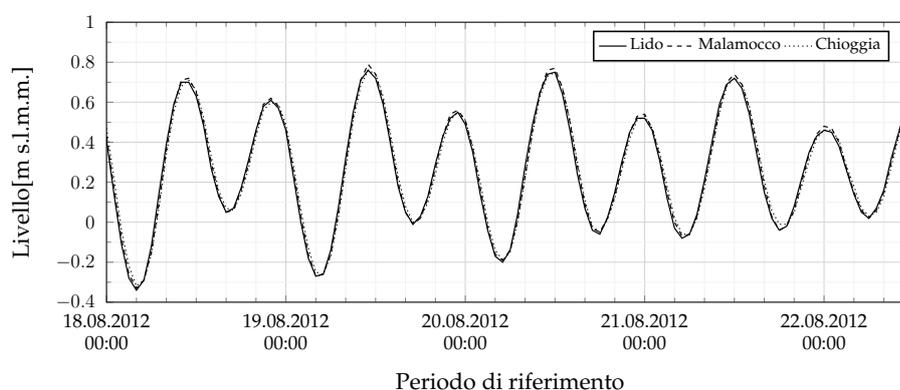
Il calcolo delle ampiezze deriva dalla somma dei valori di massimo e minimo relativi ad uno specifico segnale di marea. Essendo l'apprezzabilità del divario nelle due configurazioni massima in queste posizioni, l'impiego di valori adeguati giova ovviamente alla buona riuscita della taratura: maggiori sono le ampiezze, maggiore sarà il divario ottenuto tra le due configurazioni e maggiore sarà l'affidabilità dei risultati ottenuti.

Il periodo non presenta sovrapposizione o prossimità con i periodi di rilievo delle velocità nei rii di Venezia.

Anche in questo caso le condizioni al contorno imposte corrispondono ai dati di livello misurati nel periodo di riferimento dalle stazioni mareografiche di Lido diga Sud, Malamocco diga Nord e Chioggia diga Sud.

Si nota come i livelli imposti siano tra loro prossimi in tutto il periodo di riferimento (fig. 4.4).

Figura 4.4: Condizioni al contorno imposte al largo



Il loro punto di applicazione è sempre coincidente con il confine al largo del braccio di mare esterno a ciascuna bocca, interessato dalla modellazione tramite griglia bidimensionale, provocando un trascurabile effetto sia sul ritardo di propagazione che sui valori di ampiezza d'onda.

Le differenze maggiori sono sempre riscontrabili in prossimità delle creste e dei cavi del segnale.

Figura 4.5: Intensità del vento misurate

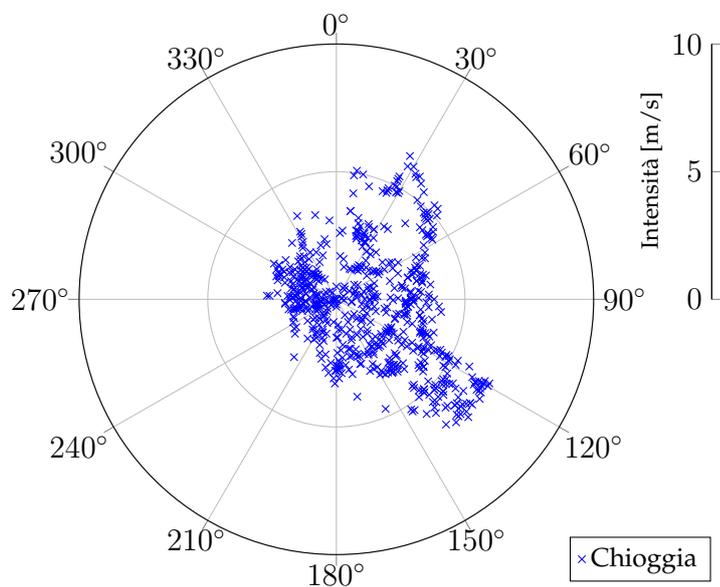
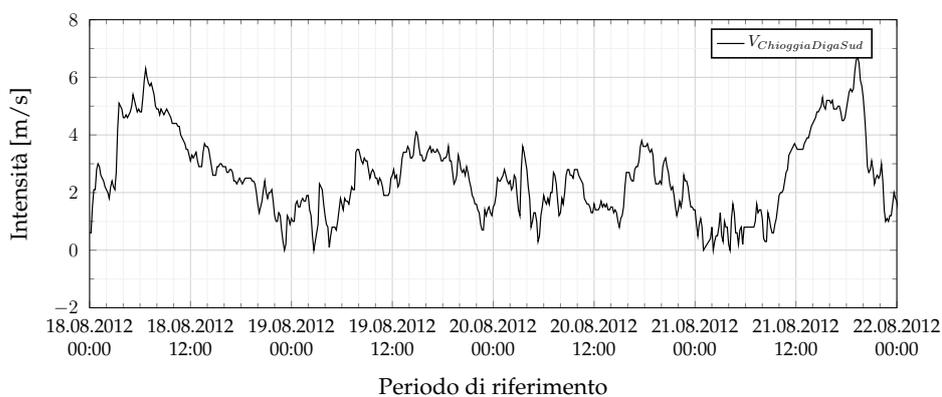


Figura 4.6: Diagramma polare Intensità - Direzione

La scelta di tale periodo è inoltre subordinata alla presenza di un vento contenuto, in modo da minimizzare gli effetti dello stesso su livelli e velocità presenti all'interno della laguna, rendendo le operazioni di taratura e successiva verifica indipendenti da tale forzante.

Questa considerazione è da ritenersi soddisfatta qualora l'intensità del vento non superi i 10 m/s .

I grafici riportati in fig. 4.5 e 4.6 dimostrano come in tutto il periodo di riferimento questa richiesta sia pienamente soddisfatta.

I parametri forniti al modello dal file *.sim* per la corretta caratterizzazione della simulazione sono:

- *TT - Durata simulazione: 430200 [s]*
- *dt - Passo temporale di calcolo: 5 [s]*
- *dtp - passo temporale stampa: 600 - 300 [s]*
- *H₀ - Quota superficie libera iniziale: + 0.43 [m s.l.m.m.]*
- *Intervallo attribuzione dei valori di livello: 3600 [s]*

L'impiego di un intervallo di stampa ridotto, pari a 5 minuti (300 s), è necessario nella fase di taratura, in quanto permette di apprezzare l'effettiva variazione dei ritardi di fase dei segnali di marea nelle configurazioni Ante e Post Mo.S.E., il cui valore stimato è mediamente pari a 10 - 20 minuti (Matticchio et al., 2017).

4.1.3 Periodo rilievi San Polo - Santa Croce

I periodi di riferimento per la misura dei dati nei canali interni alla città e per lo svolgimento della simulazione numerica utile al confronto sono:

- *Rilievo*: dalle 12:55 del 07/10/2004 alle 09:25 del 21/10/2004;
- *Simulazione*: dalle 00:00 del 07/10/2004 alle 00:00 del 22/10/2004.

L'impiego di un periodo di simulazione più esteso che contenga completamente quello di rilievo permette di evitare gli errori dovuti all'avviamento del modello, dovuta all'impiego di una condizione iniziale di livello uniforme su tutto il dominio.

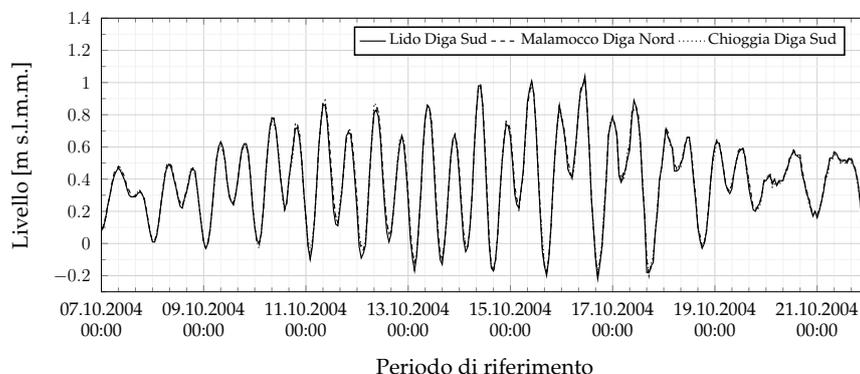
I parametri descrittivi dei canali di interesse per i rilievi delle velocità sono riportati in Tab. 4.1.

Tabella 4.1: Parametri dei canali di studio in zona San Polo - Santa Croce

Rio	Ponte	B [m]	h_f [m s.l.m.m.]	L [m]
de S. Zan Degolà	Savio	8.33	- 1.22	114.24
di S.Maria M.D.	di S.Maria M.D.	5.61	- 0.84	252.70
de le Becarie	de le Becarie	4.52	- 1.18	161.64

Le condizioni imposte al contorno esterno corrispondono ai dati di livello misurati nel periodo di simulazione dalle rispettive stazioni mareografiche di Lido diga Sud, Malamocco diga Nord e Chioggia diga Sud (fig. 4.7). I valori sono stati attribuiti con frequenza oraria.

Figura 4.7: Condizioni al contorno imposte al largo



L'intensità e la direzione del vento agente sono quelli misurati nel periodo di simulazione dagli anemometri direzionali presenti nelle stazioni meteo-mareografiche di Le Saline e Chioggia diga Sud (fig. 4.8 e 4.9). Per la simulazione, i valori sono stati attribuiti con frequenza oraria.

Figura 4.8: Intensità del vento misurate

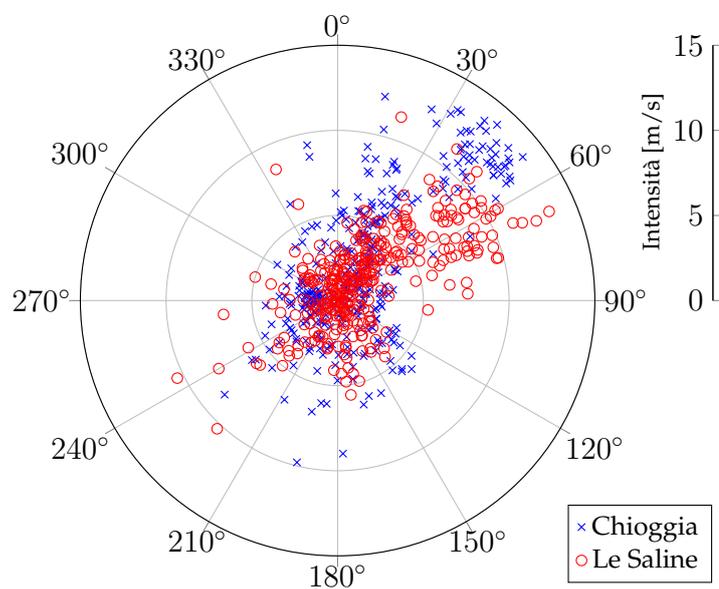
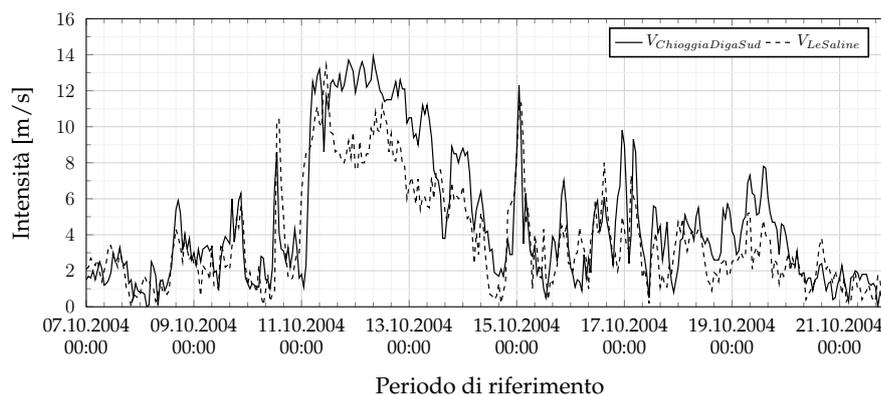


Figura 4.9: Diagramma polare Intensità - Direzione

Il vento di maggiore interesse è quello con intensità superiore ai 5 m/s. Nel periodo di riferimento questo corrisponde ad un vento di Bora proveniente da Nord-Est (10 - 80 °N).

La presenza di una vento di non trascurabile intensità per un periodo piuttosto esteso, pari a circa due giorni, ha consentito un'ottima valutazione degli effetti dello stesso sull'idrodinamica interna alla laguna.

Le simulazioni sono infatti state svolte sia in presenza che in assenza del vento, per operare i confronti i cui risultati sono riportati ai Cap. 6, 7 e 8.

I parametri forniti al modello dal file *.sim* per la corretta caratterizzazione della simulazione sono:

- *TT - Durata simulazione: 1296000 [s]*
 - *dt - Passo temporale di calcolo: 5 [s]*
 - *dtpr- passo temporale stampa: 1800 [s]*
 - *H₀ - Quota superficie libera iniziale: + 0.08 [m s.l.m.m.]*
 - *Intervallo attribuzione dei valori di livello e vento: 3600 [s]*
-

4.1.4 Periodo rilievi Dorsoduro

I periodi di riferimento per la misura dei dati nei canali interni alla città e per lo svolgimento della simulazione numerica utile al confronto sono:

- *Rilievo*: dalle 10:25 del 21/10/2004 alle 11:30 del 04/11/2004;
- *Simulazione*: dalle 00:00 del 21/10/2004 alle 00:00 del 05/11/2004.

L'impiego di un periodo di simulazione più esteso che contenga completamente quello di rilievo permette di evitare gli errori dovuti all'avviamento del modello, dovuta all'impiego di una condizione iniziale di livello uniforme su tutto il dominio.

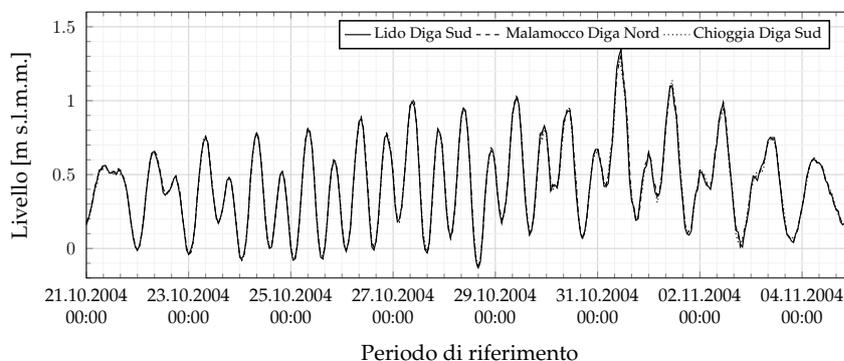
I parametri descrittivi dei canali di interesse per i rilievi delle velocità sono riportati in Tab. 4.2.

Tabella 4.2: Parametri dei canali di studio in zona Dorsoduro

Rio	Ponte	B [m]	h_f [m s.l.m.m.]	L [m]
de l'Arzere	di Insula	21.58	- 1.60	114.94
del Tentor	dei Guardiani	12.75	-1.21	189.30
di S. Margherita	Foscarini	11.69	- 1.33	94.42

Le condizioni imposte al contorno esterno corrispondono ai dati di livello misurati nel periodo di simulazione dalle rispettive stazioni mareografiche di Lido diga Sud, Malamocco diga Nord e Chioggia diga Sud (fig. 4.10). I valori sono stati attribuiti con frequenza oraria.

Figura 4.10: Condizioni al contorno imposte al largo



L'intensità e la direzione del vento agente sono quelli misurati nel periodo di simulazione dagli anemometri direzionali presenti nelle stazioni meteo-mareografiche di Le Saline e Chioggia diga Sud (fig. 4.11 e 4.12). Per la simulazione, i valori sono stati attribuiti con frequenza oraria.

Figura 4.11: Intensità del vento misurate

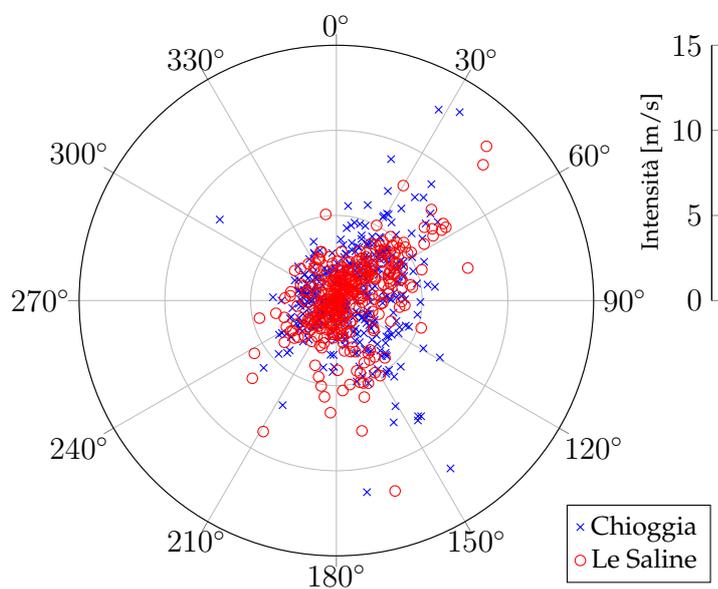
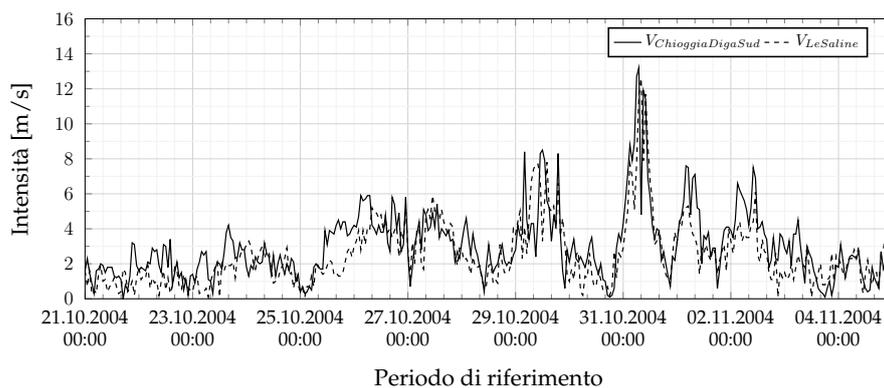


Figura 4.12: Diagramma polare Intensità - Direzione

Il vento di maggiore interesse è quello con intensità superiore ai 5 m/s. Seppur non sia di così immediata determinazione, nel periodo di riferimento questo corrisponde ad un vento di Bora proveniente da Nord-Est.

Seppur la presenza di vento di non trascurabile intensità sia ridotta, si auspica la possibilità di verificare il suo effetto anche nel limitato lasso temporale in cui questo si manifesta.

Le simulazioni sono dunque state svolte sia in presenza che in assenza del vento, per operare i confronti i cui risultati sono riportati ai Cap. 6, 7 e 8.

I parametri forniti al modello dal file *.sim* per la corretta caratterizzazione della simulazione sono:

- *TT - Durata simulazione: 1296000 [s]*
 - *dt - Passo temporale di calcolo: 5 [s]*
 - *dtp - passo temporale stampa: 1800 [s]*
 - *H₀ - Quota superficie libera iniziale: + 0.17 [m s.l.m.m.]*
 - *Intervallo attribuzione dei valori di livello e vento: 3600 [s]*
-

4.1.5 Periodo rilievi Cannaregio

I periodi di riferimento per la misura dei dati nei canali interni alla città e per lo svolgimento della simulazione numerica utile al confronto sono:

- *Rilievo*: dalle 13:50 del 04/11/2004 alle 20:05 del 25/11/2004;
- *Simulazione*: dalle 00:00 del 04/11/2004 alle 00:00 del 26/11/2004.

L'impiego di un periodo di simulazione più esteso che contenga completamente quello di rilievo permette di evitare gli errori dovuti all'avviamento del modello, dovuta all'impiego di una condizione iniziale di livello uniforme su tutto il dominio.

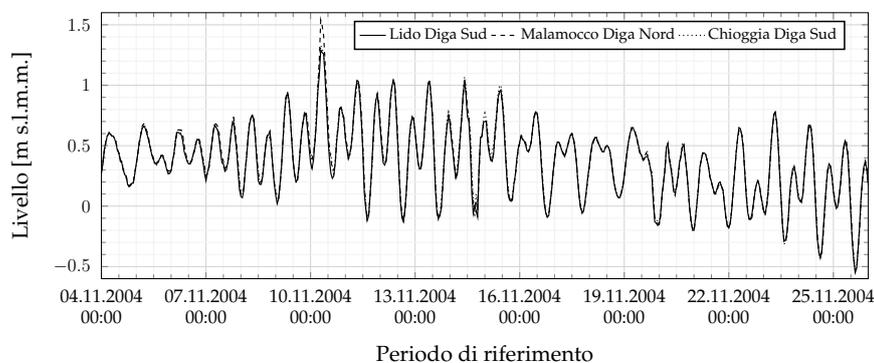
I parametri descrittivi dei canali di interesse per i rilievi delle velocità sono riportati in Tab. 4.3.

Tabella 4.3: Parametri dei canali di studio in zona Cannaregio

Rio	Ponte	B [m]	h_f [m s.l.m.m.]	L [m]
di San Giobbe	di San Giobbe	5.00	- 1.19	94.02
de la Misericordia	del Ghetto Novo	18.81	- 1.13	102.77
di San Felice	Belli	6.23	-1.48	117.86

Le condizioni imposte al contorno esterno corrispondono ai dati di livello misurati nel periodo di simulazione dalle rispettive stazioni mareografiche di Lido diga Sud, Malamocco diga Nord e Chioggia diga Sud (fig. 4.13). I valori sono stati attribuiti con frequenza oraria.

Figura 4.13: Condizioni al contorno imposte al largo



L'intensità e la direzione del vento agente sono quelli misurati nel periodo di simulazione dagli anemometri direzionali presenti nelle stazioni meteo-mareografiche di Le Saline e Chioggia diga Sud (fig. 4.14 e 4.15). Per la simulazione, i valori sono stati attribuiti con frequenza oraria.

Figura 4.14: Intensità del vento misurate

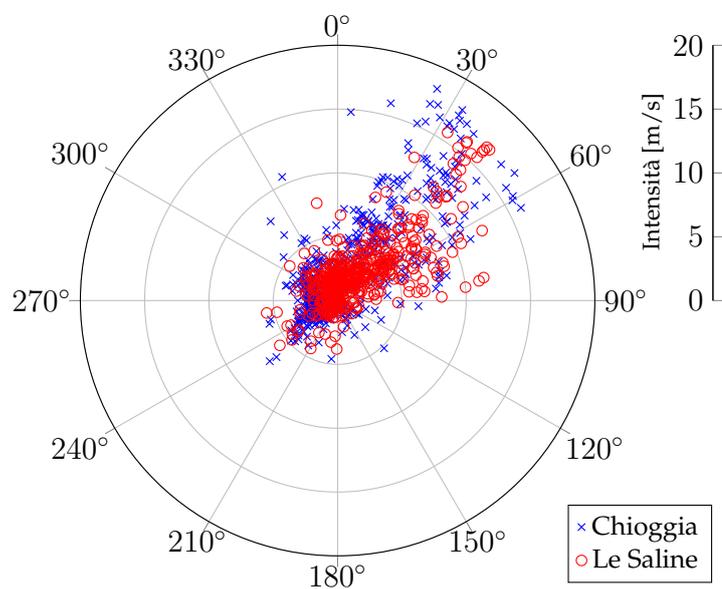
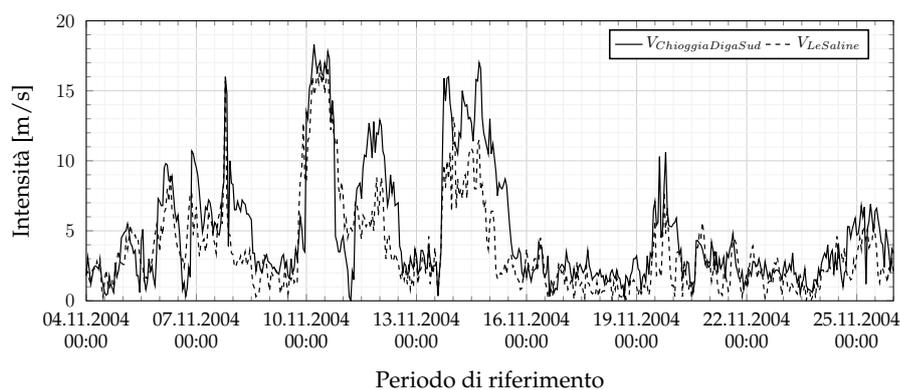


Figura 4.15: Diagramma polare Intensità - Direzione

Il vento di maggiore interesse è quello con intensità superiore ai 5 m/s. Nel periodo di riferimento questo corrisponde ad un vento di Bora proveniente da Nord-Est (20 - 70 °N).

Il vento agente risulta in molti casi di intensità elevata, raggiungendo e superando in più occasioni i 17 m/s , corrispondenti a circa 60 km/h . Vista la buona estensione temporale di questi eventi, ci si aspetta che l'effetto atteso sull'idrodinamica della laguna sia rilevante.

Anche in questo caso dunque, le simulazioni sono state svolte sia in presenza che in assenza del vento, per operare i confronti i cui risultati sono riportati ai Cap. 6, 7 e 8.

I parametri forniti al modello dal file *.sim* per la corretta caratterizzazione della simulazione sono:

- *TT - Durata simulazione:* 1900800 [s]
 - *dt - Passo temporale di calcolo:* 5 [s]
 - *dtpr - passo temporale stampa:* 1800 [s]
 - *H₀ - Quota superficie libera iniziale:* + 0.27 [m s.l.m.m.]
 - *Intervallo attribuzione dei valori di livello e vento:* 3600 [s]
-

4.1.6 Periodo rilievi Castello

I periodi di riferimento per la misura dei dati nei canali interni alla città e per lo svolgimento della simulazione numerica utile al confronto sono:

- *Rilievo*: dalle 10:30 del 07/12/2004 alle 11:45 del 13/12/2004;
- *Simulazione*: dalle 00:00 del 07/12/2004 alle 00:00 del 14/12/2004.

L'impiego di un periodo di simulazione più esteso che contenga completamente quello di rilievo permette di evitare gli errori dovuti all'avviamento del modello, dovuta all'impiego di una condizione iniziale di livello uniforme su tutto il dominio.

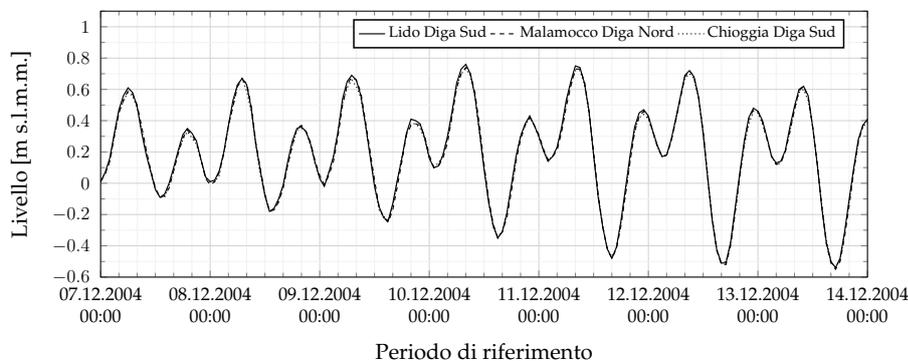
I parametri descrittivi dei canali di interesse per i rilievi delle velocità sono riportati in Tab. 4.4.

Tabella 4.4: Parametri dei canali di studio in zona San Polo - Santa Croce

Rio	Ponte	B [m]	h_f [m s.l.m.m.]	L [m]
de la Tana	de la Tana	11.25	- 1.32	207.38
de S. Isepo	de S. Isepo	8.06	- 1.06	270.30
dei Giardini	della Biennale	15.40	- 1.73	-

Le condizioni imposte al contorno esterno corrispondono ai dati di livello misurati nel periodo di simulazione dalle rispettive stazioni mareografiche di Lido diga Sud, Malamocco diga Nord e Chioggia diga Sud (fig. 4.16). I valori sono stati attribuiti con frequenza oraria.

Figura 4.16: Condizioni al contorno imposte al largo



L'intensità e la direzione del vento agente sono quelli misurati nel periodo di simulazione dagli anemometri direzionali presenti nelle stazioni meteo-mareografiche di Le Saline e Chioggia diga Sud (fig. 4.17 e 4.18). Per la simulazione, i valori sono stati attribuiti con frequenza oraria.

Figura 4.17: Intensità del vento misurate

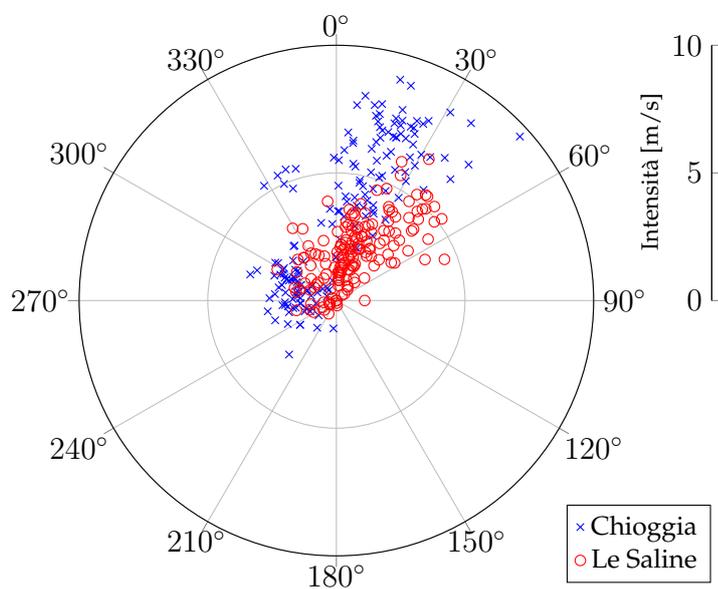
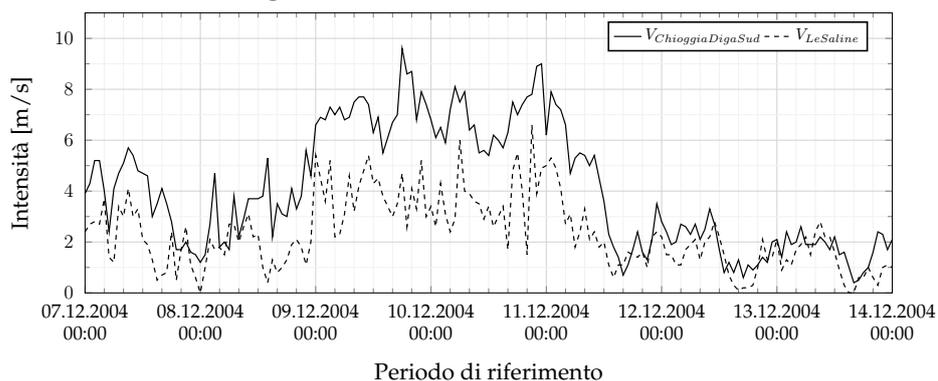


Figura 4.18: Diagramma polare Intensità - Direzione

Il vento di maggiore interesse è quello con intensità superiore ai 5 m/s.

Nel periodo di riferimento questo corrisponde ad un vento di Bora proveniente da Nord-Est (0 - 60 °N).

Come già riportato in sottosezione 4.1.1, il vento agente in questo periodo non è mediamente di notevole intensità, almeno in paragone a quello registrato negli altri periodi.

Ciò nonostante sono state comunque svolte simulazioni sia in assenza che in presenza di vento, per operare i confronti i cui risultati sono riportati ai Cap. 6, 7 e 8.

I parametri forniti al modello dal file *.sim* per la corretta caratterizzazione della simulazione sono:

- *TT - Durata simulazione: 568800 [s]*
 - *dt - Passo temporale di calcolo: 5 [s]*
 - *dtp - passo temporale stampa: 1800 [s]*
 - *H₀ - Quota superficie libera iniziale: + 0.01 [m s.l.m.m.]*
 - *Intervallo attribuzione dei valori di livello e vento: 3600 [s]*
-

Capitolo 5

Taratura e verifica dei modelli numerici

5.1 Introduzione

L'impiego di un modello numerico è necessariamente preceduto da un'ap-
posita operazione di taratura.

Tale operazione nasce dall'esigenza di garantire l'affidabilità dei risul-
tati forniti dal procedimento numerico, basandosi sulla scelta del set di pa-
rametri che permettano al modello di simulare correttamente il fenomeno
reale.

Per fare questo è necessaria la disponibilità di dati su cui basare la
taratura del modello, il quale risulta correttamente calibrato qualora sia
in grado di raggiungere un risultato quanto più prossimo al dataset di
riferimento.

Non essendo possibile raggiungere l'ottimo assoluto nel processo di ta-
ratura, la ricerca dell'ottimo viene solitamente basata sull'impiego di uno
specifico valore di *tolleranza* oltre il quale il risultato si ritiene accettabile.

La taratura viene spesso condotta basandosi sull'impiego di *parametri
statistici*, per la valutazione dei risultati ottenuti (vedi sezione 3.4).

La calibrazione del modello della laguna si basa sulle seguenti operazioni:

- *Verifica esterna*: si valuta se la mancata corrispondenza tra il punto di applicazione e di misurazione delle condizioni al contorno possa o meno influenzare negativamente la performance del modello. Il riferimento sono i dati forniti dalle stazioni meteo-mareografiche esterne alle tre bocche di porto, posizionate sulle rispettive opere di protezione foranee. La verifica, svolta dal punto di vista grafico e numerico, interessa entrambe le configurazioni della griglia computazionale;
- *Taratura intermedia*: utile alla scelta dei valori di K_S che possano correttamente rappresentare l'effetto indotto dalle modifiche apportate alle bocche di porto sulla propagazione dell'onda di marea. Le stazioni di riferimento corrispondono a quelle impiegate da Ziggiotto, 2013 e Matticchio et al., 2017 per la verifica del modello della laguna;
- *Verifica interna*: per monitorare l'effettiva capacità del modello di simulare la propagazione dell'onda di marea nel territorio lagunare. Le stazioni di riferimento sono le stesse usate per la taratura;
- *Analisi di sensibilità*: per determinare la più corretta distribuzione delle scabrezze nella rete dei rii di Venezia.

Seppur la validità del modello relativo alla configurazione Ante Mo.S.E. sia comprovata da numerosi studi e verifiche precedenti, tutti i passaggi sopra descritti, fuorché la calibrazione dei parametri di scabrezza alle bocche, interesseranno entrambe le griglie computazionali.

Questo in primo luogo serve per verificare la validità delle modifiche apportate alla griglia computazionale nella configurazione Ante Mo.S.E. (riportate in fig. 2.4). In secondo luogo risulta utile per il confronto dei risultati ottenuti con il modello Post Mo.S.E.. Infine assicura il corretto svolgimento dello studio delle velocità dei rii della città di Venezia, strettamente legato ad una corretta modellazione dei livelli presenti in laguna.

5.2 Verifica Livelli alle Bocche di Porto

La riduzione della zona di mare interessata dalla griglia bidimensionale del modello comporta necessariamente l'impiego di un appropriato set di condizioni al contorno da applicare al bordo libero, corrispondenti ai livelli misurati nelle stazioni più esterne alle bocche di porto, rispettivamente Lido diga Sud, Malamocco diga Nord e Chioggia diga Sud.

Non essendoci corrispondenza del bordo esterno con la posizione delle stazioni meteo-mareografiche di riferimento, l'applicazione di tali condizioni al contorno può comportare un ritardo e una riduzione dell'altezza d'onda dovuta alla sua propagazione tra il punto fittizio di applicazione e il punto reale di misurazione di tali valori.

Utilizzando i valori ottenuti dalle simulazioni di verifica dei modelli Ante e Post Mo.S.E., sulla base di una valutazione puramente grafica, possono trarsi le seguenti considerazioni:

- I valori misurati nelle stazioni mareografiche sono quasi del tutto coincidenti con quelli utilizzati come condizioni al contorno al bordo libero (fig. da 5.1 a 5.6). L'errore espresso in misura percentuale rispetto al valore corretto (BC) risulta sempre inferiore all'1.5 % del valore reale, se non in alcuni rari casi;
- La valutazione del ritardo non può essere svolta dal punto di vista numerico vista la bassa frequenza di acquisizione delle stazioni di riferimento (1 dato ogni 10 minuti).
Questa evidenza come la quasi perfetta corrispondenza dei valori di livello misurati nelle singole posizioni alle bocche comporta una estremamente ridotta presenza di effetti dovuti alla propagazione, che possono dunque ritenersi trascurabili;
- Il ritardo presente nel caso Post Mo.S.E risulta leggermente più accentuato in alcune posizioni rispetto al caso Ante Mo.S.E.
Questo è dovuto all'effetto delle dighe foranee poste all'esterno delle bocche di porto nella configurazione più recente. Il loro effetto è comunque trascurabile.

La validità dell'applicazione delle BC al bordo libero esterno alle bocche è dunque verificata.

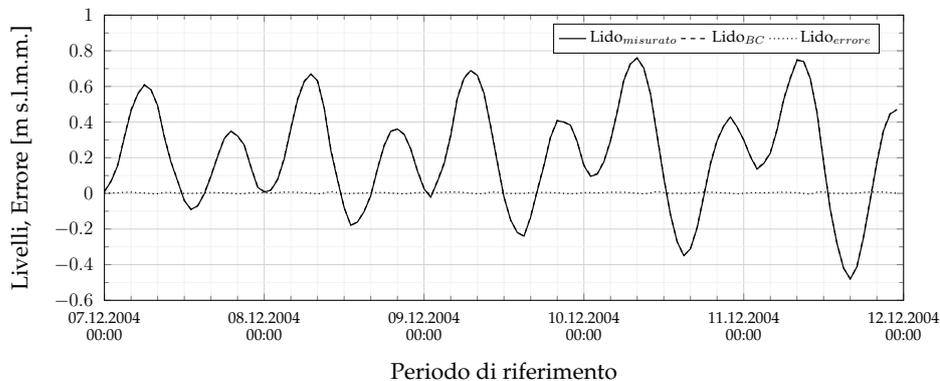
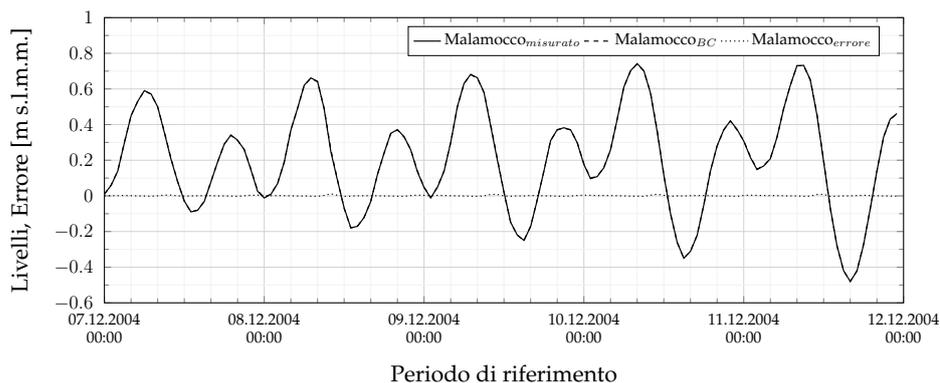
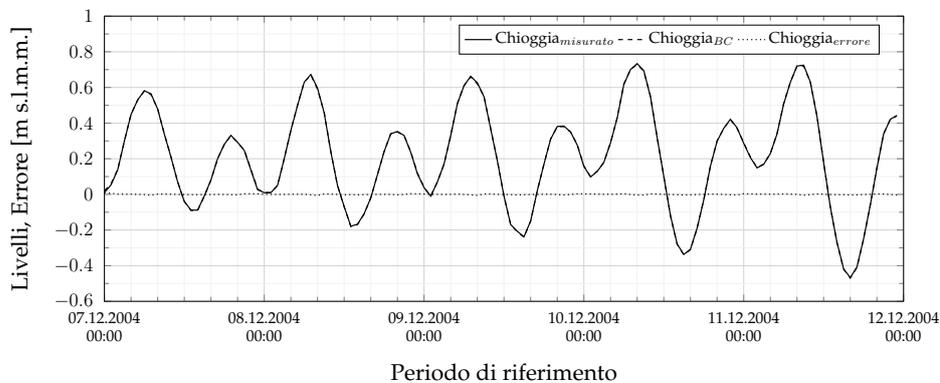
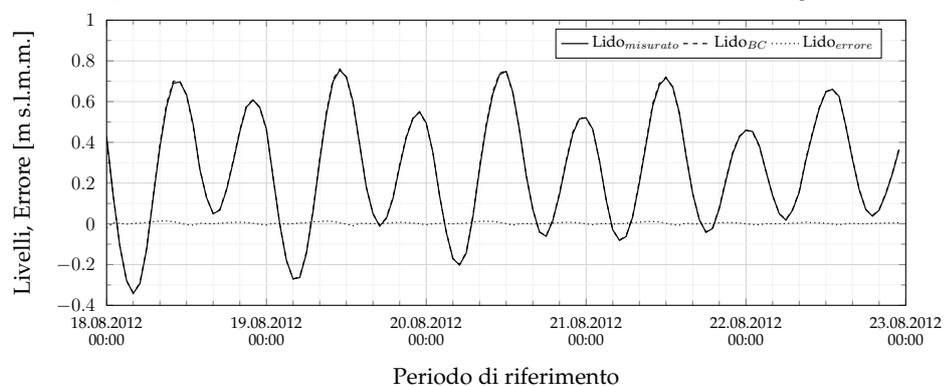
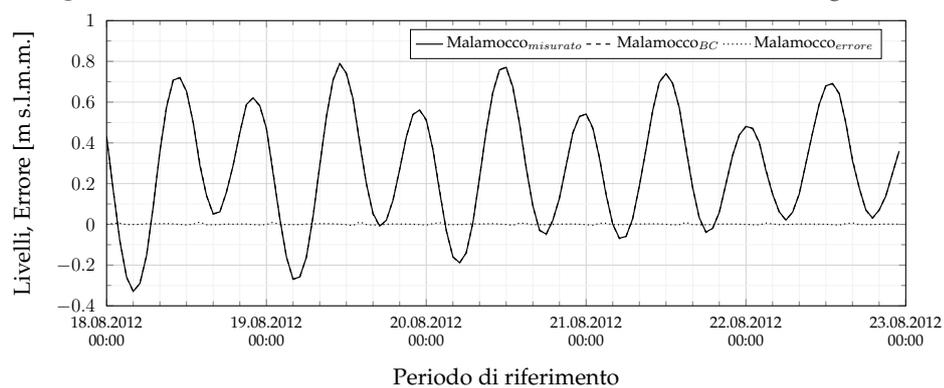
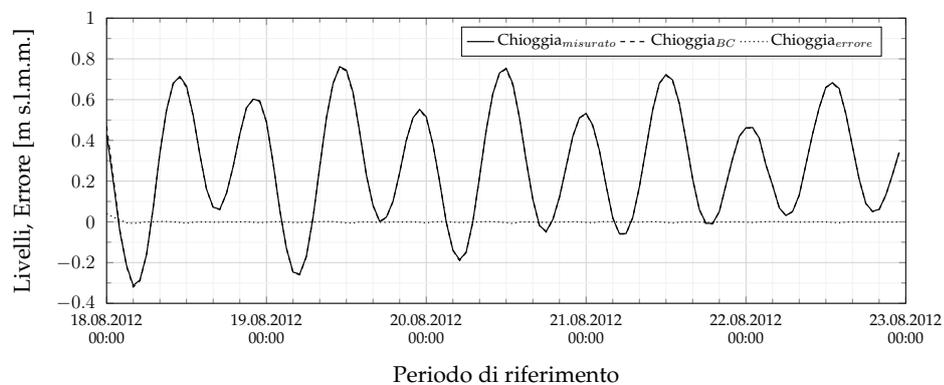
Figura 5.1: Confronto livelli - Periodo Ante Mo.S.E. - Lido Diga Sud**Figura 5.2:** Confronto livelli - Periodo Ante Mo.S.E. - Malamocco Diga Nord**Figura 5.3:** Confronto livelli - Periodo Ante Mo.S.E. - Chioggia Diga Sud

Figura 5.4: Confronto livelli - Periodo Post Mo.S.E. - Lido Diga Sud**Figura 5.5:** Confronto livelli - Periodo Post Mo.S.E. - Malamocco Diga Nord**Figura 5.6:** Confronto livelli - Periodo Post Mo.S.E. - Chioggia Diga Sud

5.3 Taratura della scabrezza alle bocche di porto

5.3.1 Effetti dovuti alle opere

Il periodo considerato per la taratura del modello è quello compreso tra le ore 00:00 del 18/08/2012 e le ore 23:50 del 22/08/2012.

L'effetto dovuto all'inserimento nel modello delle sole opere fisse è stato ottenuto ipotizzando che gli interventi svolti alle bocche non abbiano contribuito in nessun modo alla modifica delle scabrezze al fondo.

Il valore di K_S attribuito alle singole bocche risulta dunque invariato rispetto alla configurazione Ante Mo.S.E. ($K_S = 35m^{1/3}/s$).

Tale ipotesi di calcolo è stata considerata allo scopo di inizializzare il processo di taratura, descritto in sottosezione 5.3.2, identificando il contributo iniziale dato dall'inserimento delle singole opere, a cui aggiungere successivamente quello dato dalla componente di scabrezza al fondo.

I valori sono stati inseriti in Tab. 5.1 per la bocca di Lido e 5.2 per le bocche di Malamocco e Chioggia.

Una loro analisi porta alle seguenti considerazioni:

- In merito alle modificazioni percentuali delle *ampiezze medie*, legate ai massimi e minimi relativi, si nota come il contributo delle singole opere ricopra circa il 50% dell'effetto di smorzamento percentuale delle mareggiate. Tale considerazione è valida per tutte le stazioni di riferimento;
- In merito alle modifiche del *ritardo di fase medio*, l'effetto prodotto dalle singole opere risulta in alcuni casi superiore rispetto a quello riscontrato (Matticchio et al., 2017). Per quasi tutte le restanti stazioni l'effetto è superiore al 50% del parametro atteso.

I risultati ottenuti sembrano dunque essere in parte non adeguati.

L'analisi delle ampiezze dimostra come la calibrazione del parametro di scabrezza da attribuire al fondo della zona di influenza delle bocche sia necessaria per la corretta quantificazione degli effetti prodotti dalle opere fisse del Mo.S.E..

Tale considerazione è solo in parte avvalorata dai risultati ottenuti in relazione ai ritardi di fase. In alcuni casi, in particolar modo per le stazioni di Punta della Salute e Faro Rocchetta, considerabili come le stazioni di riferimento per le bocche di porto di Lido e Malamocco, la corrispondenza tra valore atteso e calcolato è già quasi ottenuta. La riduzione di K_S comporterebbe dunque una sovrastima dei valori rispetto a quelli attesi.

Seppur questo potrebbe suggerire una eccessiva estensione della zona di influenza delle modifiche apportate alle bocche, su cui applicare un diverso valore di scabrezza, questo è da escludersi in quanto non è stata apportata alcuna modifica al parametro di K_S nelle due configurazioni.

Tabella 5.1: Bacino relativo alla bocca di porto di Lido - Parametri di taratura del modello di letteratura e modellati

	U.M.	GB	BU	SE	SN	PS	MA
$\% \Delta A_{med(mod)}$	[%]	-1.90	-2.70	-3.20	-3.20	-3.10	-3.10
$\% \Delta A_{med(ril)}$	[%]	-4.90	-6.70	-6.90	-5.50	-7.00	-5.80
$\Delta R_{med(mod)}$	[min]	7.22	8.61	8.61	8.89	11.94	10.83
$\Delta R_{med(ril)}$	[min]	11.80	11.50	11.50	14.90	11.80	13.40

GB = Grassabò, BU = Burano, SE = Sant'Erasmus

SN = San Nicolò, PS = Punta Salute, MA = Marghera

Tabella 5.2: Bacini relativi alle bocche di porto di Malamocco e Chioggia - Parametri di taratura del modello di letteratura e modellati

	U.M.	FR	VA	CH
$\% \Delta A_{med(mod)}$	[%]	-3.10	-2.50	-1.80
$\% \Delta A_{med(ril)}$	[%]	-7.50	-6.60	-4.60
$\Delta R_{med(mod)}$	[min]	17.78	13.89	9.44
$\Delta R_{med(ril)}$	[min]	17.60	25.40	7.90

FR = Faro Rocchetta, VA= Valle Averte, CH = Chioggia Vigo

5.3.2 Calibrazione di K_S

La valutazione del contributo delle modifiche apportate alle singole bocche di porto sulla variazione dei fenomeni idrodinamici interni alla laguna è stata completata associando alla modifica dell'assetto geometrico della griglia computazionale, l'attribuzione di un diverso parametro di scabrezza per le singole bocche, a seguito di una apposita taratura.

I migliori risultati sono stati ottenuti utilizzando il seguente set di K_S .

Bocche	U.M.	Lido	Malamocco	Chioggia
K_S	$[m^{1/3}/s]$	30	25	28

Tali valori confermano le ipotesi sulla maggiore capacità dissipativa della bocca centrale di Malamocco rispetto a quelle di Lido e Chioggia (Maticchio et al., 2017; Ziggiotto, 2013).

Nella ricerca della configurazione ottimale di parametri, si è tenuto conto dei seguenti criteri:

- La *taratura sulle variazioni di ampiezza* è basata sulla corrispondenza delle variazioni percentuali delle ampiezze ottenute dalle simulazioni, con quelle riportate in Maticchio et al., 2017. L'esito del confronto è positivo (indicato con \checkmark) qualora la differenza tra valori calcolati e attesi non superi lo 0.50% per le variazioni percentuali delle ampiezze calcolate rispetto ai valori massimi. Tale valore è stato scelto in quanto si ritiene che un errore di questa entità, corrispondente a circa il 10% del valore delle variazioni osservate da Maticchio et al., 2017, possa essere accettabile;
- La *taratura sui ritardi di fase* si basa alla corrispondenza tra i valori attesi, sempre riportati in Maticchio et al., 2017, con quelli calcolati. L'esito del confronto è positivo (indicato con \checkmark) qualora la differenza tra i valori attesi e calcolati non superi i 5 minuti. La scelta di tale soglia è legata al valore del passo di stampa dei risultati da parte del modello. Si ritiene che un errore sui ritardi inferiore al passo di stampa sia accettabile.

I risultati sono riportati in Tab. 5.3 e 5.4.

Tabella 5.3: Bacino relativo alla bocca di porto di Lido - Parametri di taratura del modello di letteratura e modellati

	U.M.	GB	BU	SE	SN	PS	MA
$\% \Delta A_{med(mod)}$	[%]	-4.86	-6.60	-7.20	-7.39	-7.39	-7.46
$\% \Delta A_{med(ril)}$	[%]	-4.90	-6.70	-6.90	-5.50	-7.00	-5.80
		✓	✓	✓		✓	
$\Delta R_{med(mod)}$	[min]	9.44	13.89	15.00	16.94	20.83	21.39
$\Delta R_{med(ril)}$	[min]	11.80	11.50	11.50	14.90	11.80	13.40
		✓	✓	✓	✓		

GB = Grassabò, BU = Burano, SE = Sant'Erasmus

SN = San Nicolò, PS = Punta Salute, MA = Marghera

✓ = esito positivo del confronto

Tabella 5.4: Bacini relativi alle bocche di porto di Malamocco e Chioggia - Parametri di taratura del modello di letteratura e modellati

	U.M.	FR	VA	CH
$\% \Delta A_{med(mod)}$	[%]	-7.56	-6.61	-5.44
$\% \Delta A_{med(ril)}$	[%]	-7.50	-6.60	-4.60
		✓	✓	
$\Delta R_{med(mod)}$	[min]	27.22	23.06	18.61
$\Delta R_{med(ril)}$	[min]	17.60	25.40	7.90
			✓	

FR = Faro Rocchetta, VA= Valle Averte, CH = Chioggia Vigo

✓ = esito positivo del confronto

In relazione ai risultati ottenuti, si osserva che:

- Il perfetto riscontro tra dati attesi e calcolati, sia sulle variazioni delle ampiezze percentuali, che sui ritardi di fase, non sia di facile ottenimento.

L'esito della valutazione risulta comunque positivo, in quanto i dati ottenuti da almeno una stazione per bocca soddisfano i requisiti di taratura (\checkmark), fuorché per la bocca di Chioggia per cui l'impiego di un valore di K_S più alto avrebbe portato ad un peggioramento dei risultati ottenuti per le altre stazioni;

- Con riferimento alle su citate stazioni fondamentali, si nota come per queste sia per lo più verificata l'adeguatezza dei dati calcolati.

Il valore del ritardo di fase potrebbe risultare eccessivo per le stazioni di Punta della Salute e Faro Rocchetta. Ricordando però che i dati di letteratura sono stati ottenuti basandosi su un dataset molto esteso in relazione a quello qui utilizzato, ridotto per ragioni di possibilità e praticità dal punto di vista computazionale, l'errore commesso può considerarsi accettabile. Lo stesso può dirsi per i risultati di variazione percentuale di ampiezza ottenuti per San Nicolò.

- I risultati ottenuti soddisfano i valori medi attesi all'interno della laguna riportati in Matticchio et al., 2017. Tale considerazione è essen-

	U.M.	Attesi	Calcolati
<i>Media</i> ΔA_{med}	[cm]	4.000	4.846
<i>Media</i> ΔR_{med}	[min]	15.00	18.49

ziale per la corretta valutazione delle modifiche delle velocità nei rii della città di Venezia.

Alla luce di ciò il modello può considerarsi tarato con successo.

I valori dei livelli calcolati nelle varie stazioni di misura, impiegando i reticoli di calcolo nelle configurazioni precedente e successiva l'ultimazione dei lavori del Mo.S.E., con riferimento ai dati misurati nella stazione di Piattaforma CNR, sono riportati nelle fig. da 5.7 a 5.15.

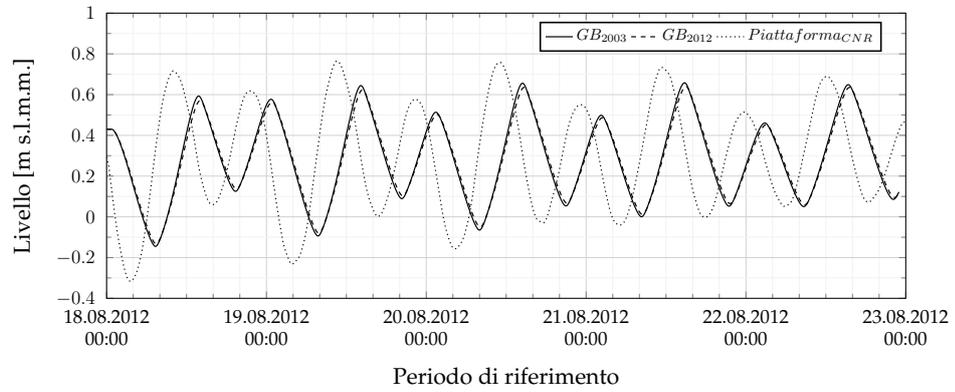
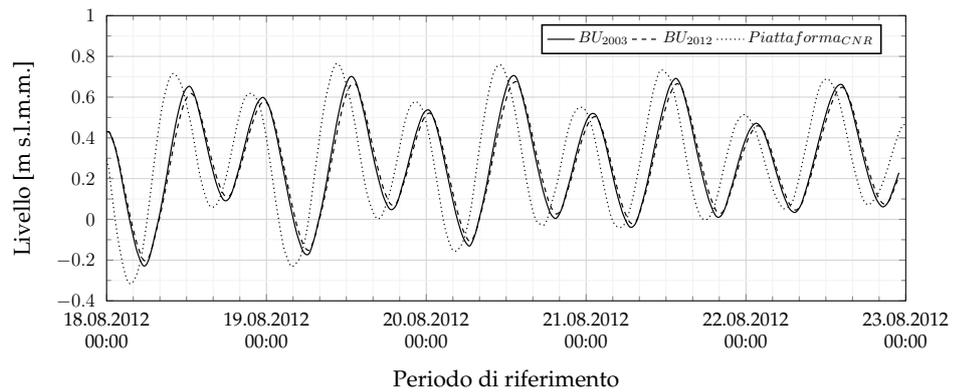
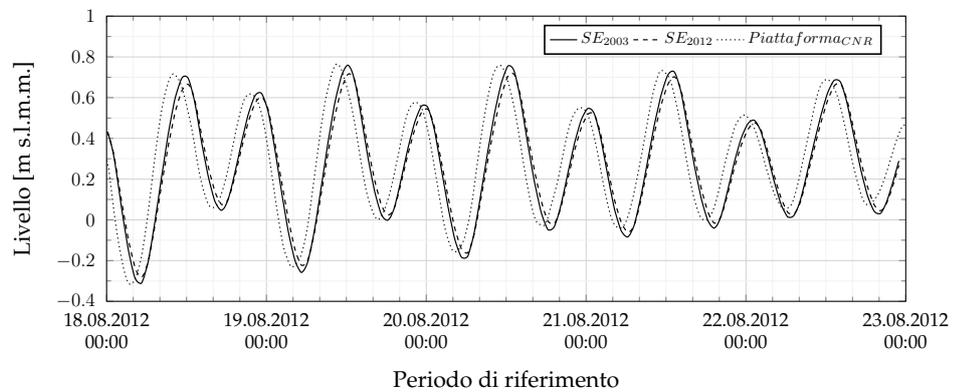
Figura 5.7: Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Grassabò**Figura 5.8:** Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Burano**Figura 5.9:** Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Sant'Erasmus

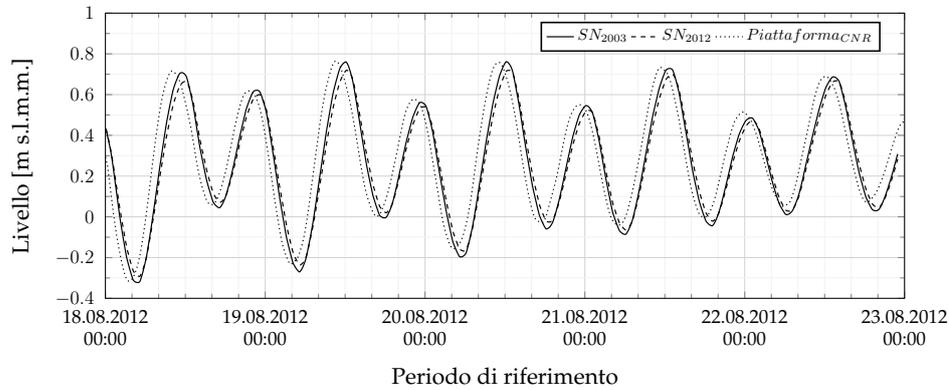
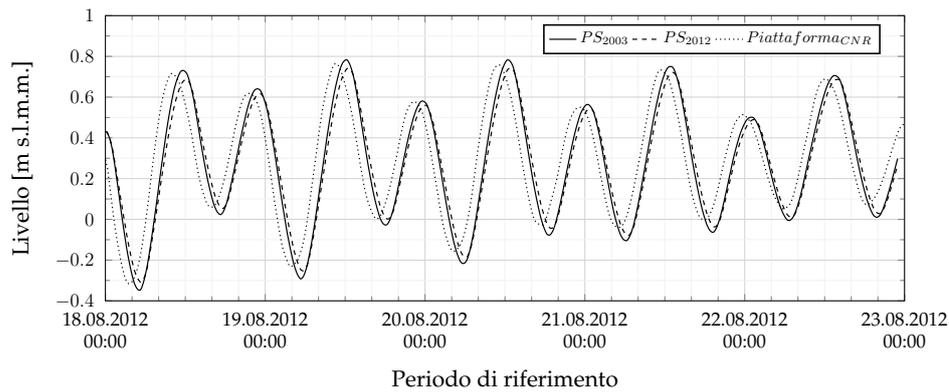
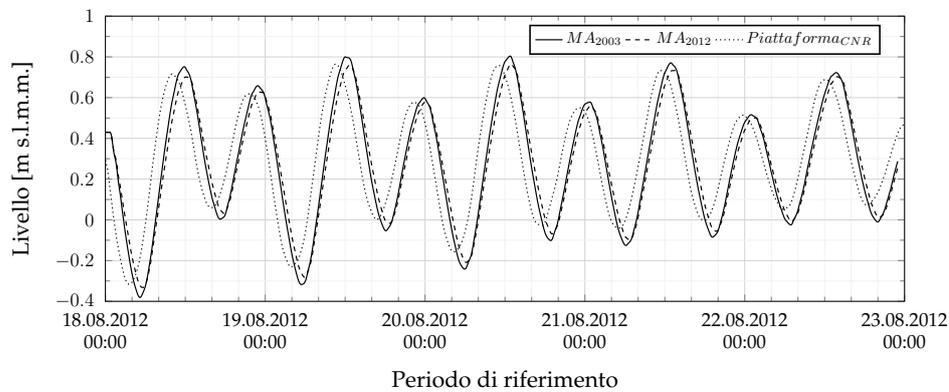
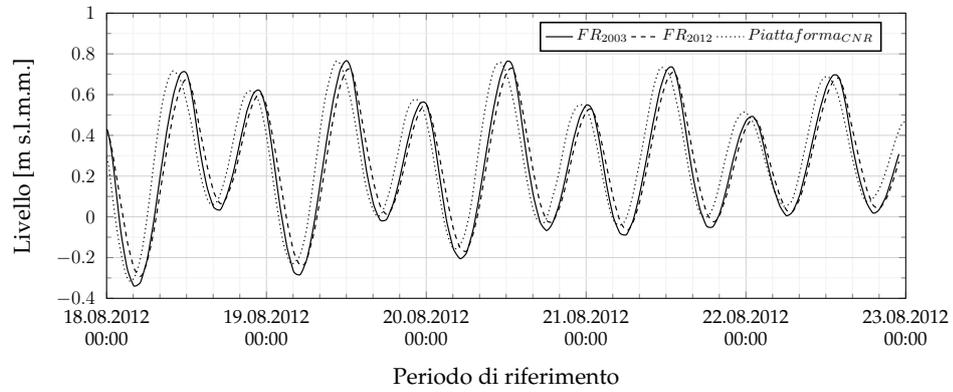
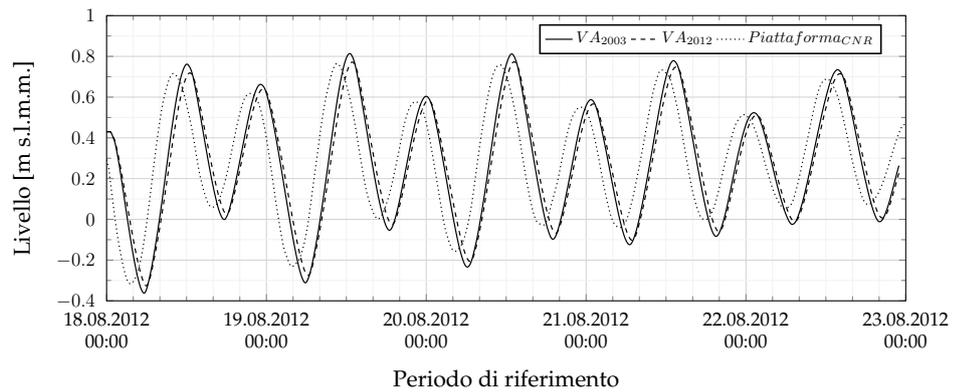
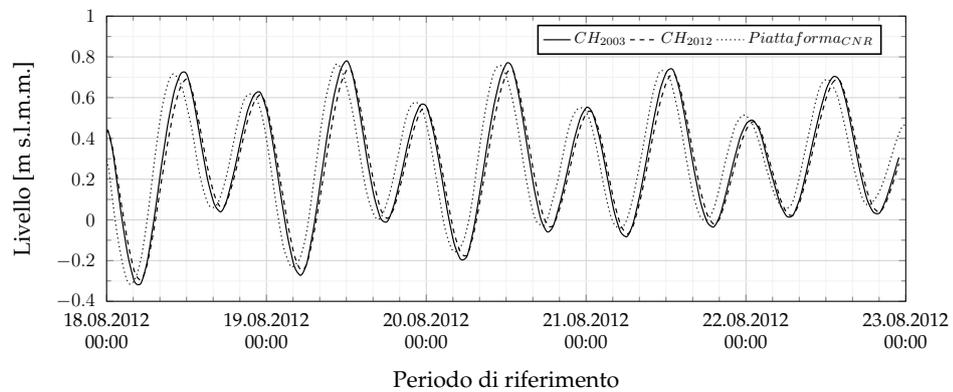
Figura 5.10: Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di San Nicolò**Figura 5.11:** Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Punta della Salute**Figura 5.12:** Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Marghera

Figura 5.13: Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Faro Rocchetta**Figura 5.14:** Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Valle Averno**Figura 5.15:** Confronto Livelli Ante-Post Mo.S.E. - Stazione di Chioggia Vigo

5.4 Verifica sui livelli

La verifica sui livelli si basa sul confronto tra i dati calcolati dal modello con quelli misurati nello stesso periodo di riferimento in 9 stazioni meteo-mareografiche distribuite all'interno della laguna di Venezia (fig. 3.1).

Le stazioni di misura scelte sono quelle utilizzate per la taratura delle scabrezze da attribuire alle bocche di porto, in quanto è garantita la presenza di almeno una stazione per ogni bacino alimentato dalle diverse bocche, oltre che la disponibilità di dati di livello misurati nei periodi considerati per la verifica.

Quest'ultimo aspetto non è valido per la stazione di Fusina, che non è stata dunque considerata per la verifica.

Sebbene i dati misurati dalla stazione di Faro Rocchetta nel periodo successivo all'ultimazione delle opere alle bocche siano parzialmente incompleti, è stato comunque ritenuto opportuno il loro utilizzo per la presente verifica, in quanto stazione fondamentale per la caratterizzazione del comportamento del bacino di Malamocco.

Si ricorda come la verifica dei risultati ottenuti sia stata svolta non solamente attraverso una valutazione grafica, bensì facendo anche riferimento ai parametri statistici predisposti a tale scopo e descritti in 3.4:

- il *Nash-Sutcliffe Model Efficiency (ME)*;
- il *Percentage Model Bias (PB)*.

La verifica viene svolta confrontando i dati misurati, con i valori calcolati non considerando gli effetti del vento.

5.4.1 Risultati Modello Ante Mo.S.E.

Il periodo considerato per la verifica del modello Ante Mo.S.E. è quello compreso tra le ore 00:00 del 07/12/2004 e le ore 23:50 dell'11/12/2004, le cui caratteristiche sono riportate in sottosezione 4.1.1.

I valori dei parametri statistici utilizzati per la validazione sono riportati in Tab. 5.5 e 5.6 per tutte le stazioni considerate, distinte in relazione al loro bacino di appartenenza.

Tabella 5.5: Bacino relativo alla bocca di porto di Lido - Valori parametri statistici riferiti alle stazioni meteo-mareografiche

	GB	BU	SE	SN	PS	MA
ME	0.973	0.981	0.997	0.993	0.996	0.994
PB	-11.37	-10.21	-0.94	3.83	-4.67	-4.47

GB = Grassabò, BU = Burano, SE = Sant'Erasmus

SN = San Nicolò, PS = Punta Salute, MA = Marghera

Tabella 5.6: Bacini relativi alle bocche di porto di Malamocco e Chioggia - Valori parametri statistici riferiti alle stazioni meteo-mareografiche

	FR	VA	CH
ME	0.978	0.987	0.997
PB	21.23	1.61	-3.10

FR = Faro Rocchetta, VA= Valle Averte

CH = Chioggia Vigo

Si osserva che:

- I dati ottenuti secondo il Nash-Sutcliffe Model Efficiency (ME) evidenziano un'ottima capacità rappresentativa da parte del modello numerico, in quanto tutte le stazioni rientrano nella categoria "Eccellente";
- I valori ottenuti secondo il Percentage Model Bias (PB) evidenziano una situazione simile ma non del tutto analoga. Quasi tutte le stazioni ricadono nella categoria "Eccellente" (<10), alcune sottostiman-

do il valore di errore, altre sovrastimandolo, senza però avere una linea comune di comportamento per quelle appartenenti allo stesso sottobacino, e dunque riferite alla stessa bocca di porto;

- Le stazioni di Grassabò e Burano rientrano nella categoria "*Molto Buona*" ($10 \div 20$). I valori dei risultati ottenuti vengono sottostimati rispetto a quelli calcolati;
- La stazione di Faro Rocchetta entra di poco nella categoria "*Buona*" ($20 \div 40$). In questo caso i valori dei livelli ottenuti risultano sovrastimati rispetto ai valori misurati.

Si ricorda come tali considerazioni si basino su valori di livello calcolati non considerando l'effetto dovuto alla presenza del vento, in modo da rendere il risultato indipendente da questa forzante meteorologica, attribuendogli validità anche in sua assenza.

A tale scopo si ricorda come il periodo sia stato scelto in modo da avere un valore della forzante meteorologica quanto più ridotto possibile. Non essendo possibile ridurre al minimo l'effetto di errore dovuto alla sua mancata considerazione, ci si aspetta comunque di ottenere un certo miglioramento della capacità di stima del modello al momento del suo inserimento nelle equazioni risolutive.

Alla luce dei risultati ottenuti e delle considerazioni sopra riportate, l'ottima capacità del modello di descrivere i fenomeni idrodinamici presenti in laguna è comprovata.

L'esito della verifica è dunque positivo.

5.4.2 Risultati Modello Post Mo.S.E.

Il periodo considerato per la verifica del modello Post Mo.S.E. è quello compreso tra le ore 00:00 del 18/08/2012 e le ore 23:50 del 22/08/2012, le cui caratteristiche sono riportate in sottosezione 4.1.2.

I valori dei parametri statistici utilizzati per la validazione sono riportati in Tab. 5.7 e 5.8 per tutte le stazioni considerate, distinguendole in relazione al loro bacino di appartenenza.

Tabella 5.7: Bacino relativo alla bocca di porto di Lido - Valori parametri statistici riferiti alle stazioni meteo-mareografiche

	GB	BU	SE	SN	PS	MA
ME	0.952	0.977	0.986	0.980	0.980	0.992
PB	3.23	-6.05	-1.49	-5.81	-6.41	-0.96

GB = Grassabò, BU = Burano, SE = Sant'Erasmus

SN = San Nicolò, PS = Punta Salute, MA = Marghera

Tabella 5.8: Bacini relativi alle bocche di porto di Malamocco e Chioggia - Valori parametri statistici riferiti alle stazioni meteo-mareografiche

	FR	VA	CH
ME	0.989	0.971	0.944
PB	1.53	-4.47	-4.49

FR = Faro Rocchetta, VA= Valle Averte

CH = Chioggia Vigo

Si osserva che:

- La valutazione dei dati ottenuti per mezzo del Nash-Sutcliffe Model Efficiency (ME) verifica l'ottima capacità rappresentativa da parte del modello numerico nella propagazione dei livelli di marea nell'intero bacino lagunare. Tutte le stazioni rientrano infatti nella classe "Eccellente".

I valori di tale parametro sono però leggermente inferiori di quelli ottenuti per il modello Ante Mo.S.E., fuorché per la stazione di Faro

Rocchetta, dove si assiste ad un leggero miglioramento della capacità rappresentativa del fenomeno propagatorio;

- Anche la valutazione dei dati secondo il Percentage Model Bias (PB) verifica l'ottima capacità descrittiva del modello, in quanto tutte le stazioni rientrano nella categoria "Eccellente"
Rispetto al caso Ante Mo.S.E. si assiste però ad un netto miglioramento per quelle stazioni la cui capacità rappresentativa non era ottima, e un leggero peggioramento per le rimanenti;
- Per quanto riguarda la qualità dei valori calcolati, con riferimento al parametro PB, si nota come per le stazioni di Grassabò, San Nicolò e Valle Averno sia presente una inversione di tendenza sul modo in cui i valori vengono stimati;
- Con riferimento ai dati riportati in Tab. 5.3 e 5.4, fuorchè per le stazioni di Burano e Faro Rocchetta risultano valide le considerazioni sulla qualità dei dati ottenuti dal modello in fase di taratura, in relazione alle sue capacità di sovrastima o sottostima dei valori corretti.

Alla luce di ciò, anche in questo caso la validità del modello e la sua capacità rappresentativa risultano pienamente verificate.

5.5 Analisi di sensibilità sulle scabrezze dei rii

L'analisi di sensibilità nei rii della città di Venezia ha lo scopo di individuare la più corretta distribuzione delle scabrezze nella rete canali, sulla base dei confronti tra i dati calcolati dal modello e i valori delle velocità misurate su 12 canali di riferimento, descritti al Capitolo 3.

I periodi di riferimento sono dunque quelli in cui sono state svolte le misure di velocità nei rii.

Il reticolo numerico di riferimento per le simulazioni è quello relativo alla configurazione Ante Mo.S.E..

I confronti sono svolti utilizzando il parametro statistico SSD (Errore Previsionale Medio), che permette di considerare, oltre all'errore sull'ammontare effettivo del valore della velocità calcolata rispetto a quella misurata, anche la correlazione tra i due segnali, con l'omonimo coefficiente, e le relazioni che intercorrono tra le distribuzioni delle velocità nei due dataset, tramite il confronto tra i valori delle rispettive varianze.

Lo studio si basa essenzialmente su due fasi per la ricerca della distribuzione ottimale dei K_S :

- La *prima fase* prevede il confronto dei valori misurati nei 12 canali di riferimento con quelli calcolati considerando una distribuzione uniforme della scabrezza all'interno dell'intera rete.

Questo allo scopo di individuare il più corretto valore di K_S da attribuire ai 12 canali e a quelli appartenenti alle zone omogenee in cui è stato diviso il territorio della città.

I valori di K_S utilizzati sono 25, 30, 35 e 40 $m^{1/3}/s$;

- La *seconda fase* prevede l'attribuzione dei più corretti valori di scabrezza ai singoli canali dell'intera rete, e lo svolgimento di una nuova simulazione per tutti i periodi di riferimento.

Il confronto dei nuovi dati calcolati con quelli misurati, permette di verificare il potenziale miglioramento della capacità di simulazione dovuta all'attribuzione per zone del valore di K_S .

La scelta dei corretti valori di scabrezza da attribuire ai tre canali considerati in ognuno dei vari periodi di riferimento, e di conseguenza alle zone ad essi afferenti si basa sui seguenti criteri:

- L'ottimo in termini di errore viene ottenuto dal dataset che presenta il valore più basso di SSD;
- L'ottimo in termini di distribuzione viene ottenuto dal dataset che presenta il valore del rapporto $\sigma_{calcolati} / \sigma_{osservati}$ più vicino all'unità;
- L'ottimo in termini di correlazione viene ottenuto dal dataset che presenta il massimo valore di tale parametro.

Non essendo questi criteri mai contemporaneamente verificati per i dataset di studio, la scelta dell'effettivo valore di K_S ottimale sarà rimandata a considerazioni che saranno riportate caso per caso.

In modo particolare, nella valutazione del valore di K_S ottimale, il comportamento del parametro SSD sarà spesso trascurato. Questo non in quanto l'errore in termini di intensità dovuto alla non corretta simulazione del fenomeno reale da parte del modello sia irrilevante, bensì perché si darà maggior spazio alla capacità del modello di riprodurre la forma e la distribuzione dei relativi segnali.

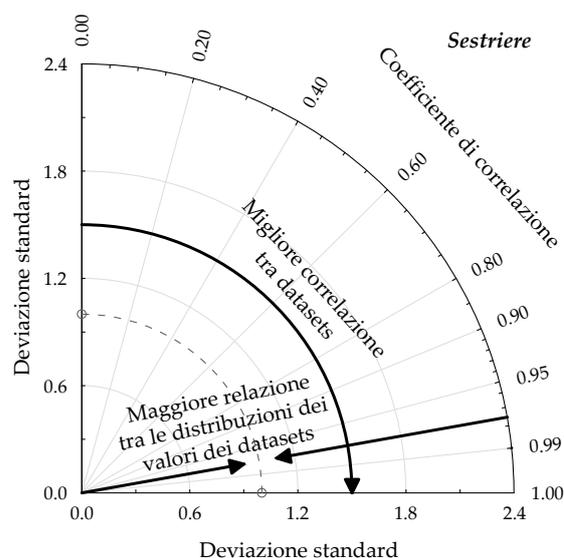


Figura 5.16: Diagramma di Taylor per le velocità: metodo di lettura dei risultati

5.5.1 Scabrezza uniforme - Risultati Canali S. Polo - S. Croce

I parametri statistici di correlazione e deviazione standard normalizzata ottenuti dal confronto tra i valori misurati e calcolati in questo periodo di studio sono stati riportati in fig. 5.17.

Il valore dell'errore previsionale quadratico (SSD) è stato invece riportato in Tab. 5.9.

Per tutti i parametri sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni con distribuzione uniforme della scabrezza nei canali.

Dalla loro analisi si ricavano le seguenti considerazioni:

- La correlazione (r) tra dati osservati e calcolati è compresa tra 0.70 e 0.90. Il modello presenta dunque buona capacità di riprodurre correttamente i valori delle velocità di deflusso;
- I valori della correlazione per lo stesso canale restano generalmente invariati al variare del parametro di scabrezza assegnato;
- La deviazione standard normalizzata (σ_N) è compresa tra 0.60 e 1.30. I dataset misurati e calcolati presentano dunque una certa affinità nella loro distribuzione;
- I valori di SSD, riportati in Tab. 5.9 evidenziano come all'aumento dei valori di K_S , tale parametro aumenti in modo sempre più rapido. L'impiego di valori troppo bassi di K_S è però da evitarsi, in quanto non coerente con i fenomeni reali considerati.

Tabella 5.9: Parametri analisi sensibilità (SSD)

K_S	S. Zan Degolà	S.Maria M.D.	Becarie
25	34545	14107	17052
30	36409	14870	17378
35	38354	16297	17857
40	42238	19026	20426

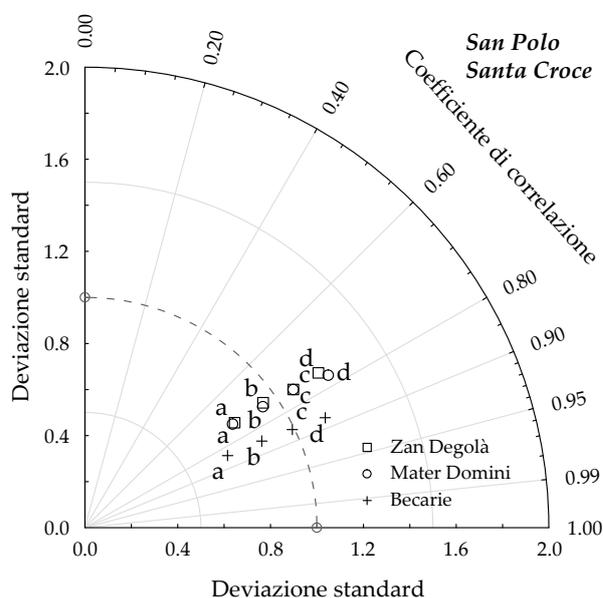


Figura 5.17: Diagramma di Taylor per le velocità nei rii: Canali zona San Polo - Santa Croce.

Sono indicati: a = K_S 25; b = K_S 30; c = K_S 35; d = K_S 40

La scelta dei corretti valori di scabrezza da attribuire ai tre canali considerati in questo periodo si attiene ai criteri riportati in sezione 5.5.

Essendo la correlazione per lo più invariante per i vari dataset relativi ad un singolo rio, i valori di K_S ottimali sono stati scelti considerando la distribuzione del valore della scabrezza per la quale la varianza normalizzata si avvicina di più all'unità.

Qualora il valore unitario sia intermedio a quello ottenuto utilizzando più distribuzioni, i loro valori di K_S saranno entrambi considerati come possibili valori ottimali.

Sulla base di tali valutazioni, i valori ottimali per i singoli canali sono:

- $K_S = 30 \div 35 \text{ m}^{1/3}/s$ per il rio de S. Zan Degolà;
- $K_S = 30 \div 35 \text{ m}^{1/3}/s$ per il rio de S. Maria Mater Domini;
- $K_S = 35 \text{ m}^{1/3}/s$ per il rio de le Becarie.

Dal confronto grafico tra valori calcolati e misurati (fig. da 5.18 a 5.20) si nota come il modello tenda a sovrastimare le velocità in fase di flusso e a sottostimare quelle in fase di riflusso in tutti e tre i rii considerati. Meno evidente è l'effetto per il rio di S.Maria M.D..

Inoltre:

- L'errore sembra essere maggiore in presenza di vento di intensità rilevante. Tale considerazione è avvalorata dalla relazione che intercorre tra la direzione della traversia principale del vento agente e la direzione dell'asse dei canali, le quali risultano per lo più coincidenti;
- Seppur i canali godano di una certa protezione da parte delle strutture che li circondano, non è da escludersi la presenza dell'effetto del vento sulle intensità a causa della loro prossimità con il Canal Grande il cui punto di collegamento, posto nella direzione del vento agente, è l'unica posizione non schermata dalla presenza di edifici.

Alla luce di tali considerazioni, il valore $K_S = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ è stato attribuito ai canali appartenenti alle zone di San Polo e Santa Croce. Tale valore è stato esteso anche alla zona di San Marco, non avendo per questa alcun dato misurato su cui basare la calibrazione.

Figura 5.18: San Polo, Santa Croce - Rio di San Zan Degolà

Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete

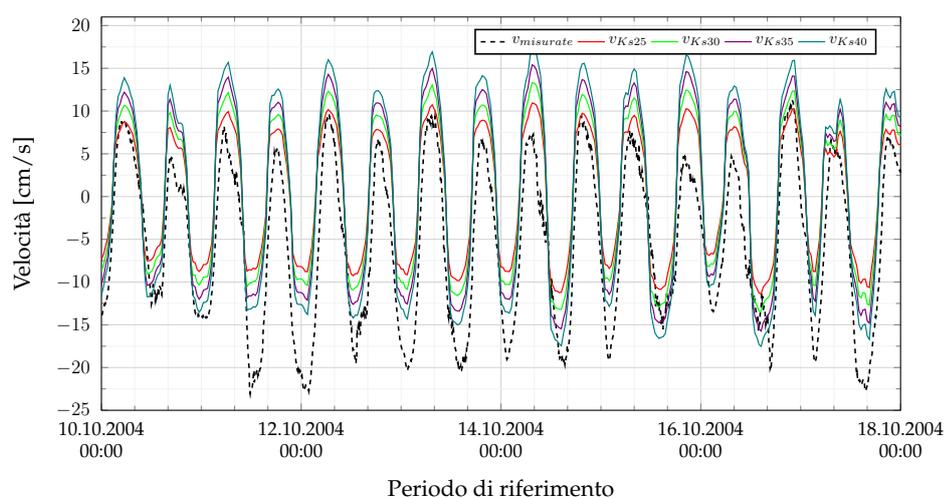


Figura 5.19: San Polo, Santa Croce - Rio di Santa Maria Mater Domini
Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete

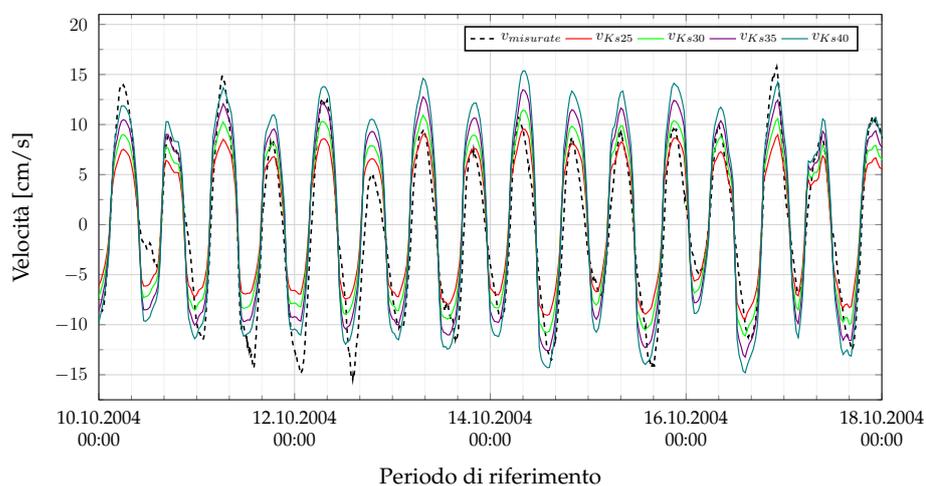


Figura 5.20: San Polo, Santa Croce - Rio delle Becarie
Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete

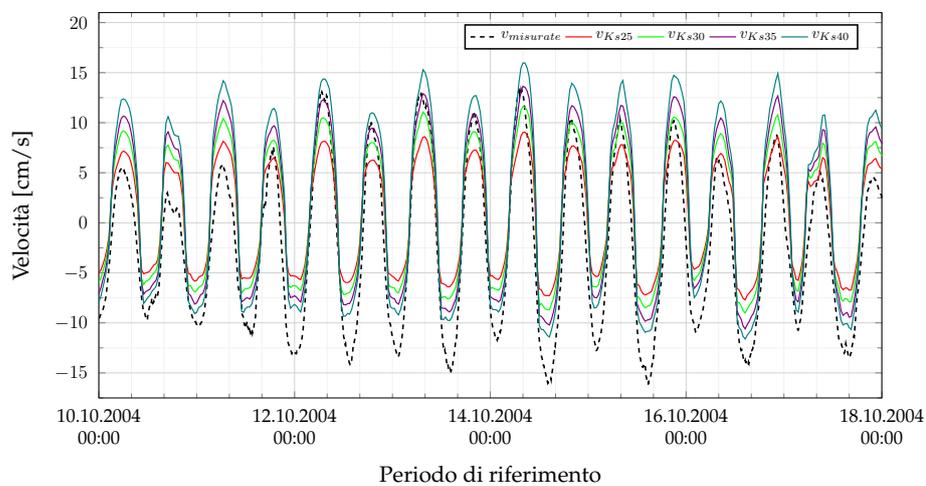
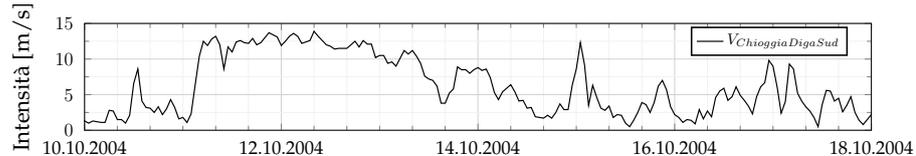


Figura 5.21: Vento misurato a Chioggia diga Sud nel periodo S.Polo - S.Croce



5.5.2 Risultati Canali Dorsoduro

I parametri statistici di correlazione e deviazione standard normalizzata ottenuti dal confronto tra i valori misurati e calcolati in questo periodo di studio sono stati riportati in fig. 5.22.

Il valore dell'errore previsionale quadratico (SSD) è stato invece riportato in Tab. 5.10.

Per tutti i parametri sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni con distribuzione uniforme della scabrezza nei canali.

Dalla loro analisi si ricavano le seguenti considerazioni:

- La correlazione (r) tra dati osservati e calcolati è compresa tra 0.10 e 0.95. Il modello presenta dunque capacità differenti di riproduzione dei valori delle velocità nei diversi canali;
- I valori della correlazione per lo stesso canale restano generalmente invariati al variare del parametro di scabrezza assegnato;
- La deviazione standard normalizzata (σ_N) è compresa tra 0.60 e 2.10. Anche la relazione tra le distribuzioni dei valori misurati e calcolati è molto diversa nei vari canali;
- I valori di SSD, riportati in Tab. 5.10 evidenziano anche in questo caso una tendenza a crescere con il valore di K_S considerato. Per il rio dell'Arzere si nota come l'ottimo in termini di errore sia raggiunto in prossimità di $K_S = 30 \text{ m}^{1/3}/s$, in quanto a questo valore corrisponde il minimo degli SSD calcolati.

Tabella 5.10: Parametri analisi sensibilità (SSD)

K_S	Arzere	Tentor	S. Margherita
25	15107	9057	12112
30	14484	9898	14466
35	15112	11471	18226
40	15982	13484	22943

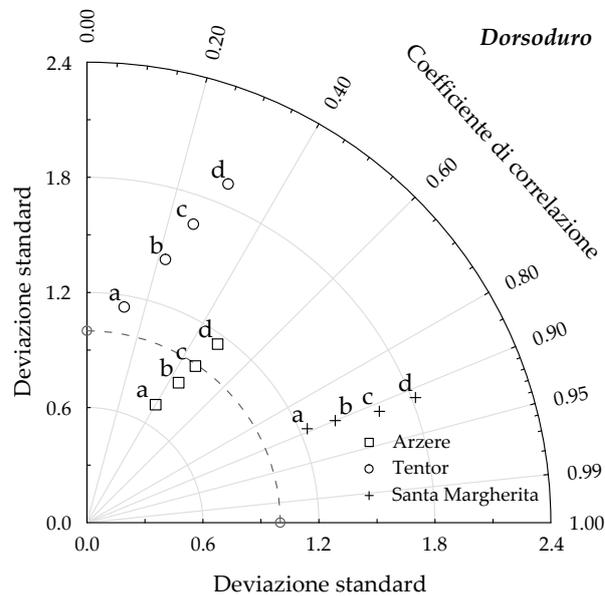


Figura 5.22: Diagramma di Taylor per le velocità nei rii: Canali zona Dorsoduro.

Sono indicati: a = K_S 25; b = K_S 30; c = K_S 35; d = K_S 40

La scelta dei corretti valori di scabrezza da attribuire ai tre canali considerati in questo periodo si attiene ai criteri riportati in sezione 5.5.

Essendo anche in questo caso la correlazione per lo più invariante per i vari dataset relativi ad un singolo rio, i valori di K_S ottimali sono stati scelti considerando la distribuzione del valore della scabrezza per la quale la varianza normalizzata si avvicina di più all'unità.

Unica eccezione in merito al comportamento della correlazione è il rio del Tentor, per cui all'incremento del valore di K_S utilizzato per la simulazione, si assiste ad un miglioramento di tale parametro, accompagnato da un peggioramento della deviazione standard normalizzata, a cui si è deciso comunque di dare maggiore rilevanza, visto il valore contenuto di r .

Sulla base di tali valutazioni, i valori ottimali per i singoli canali sono:

- $K_S = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per il rio de l'Arzere;
- $K_S < 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per il rio del Tentor;
- $K_S < 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per il rio di Santa Margherita.

Dal confronto grafico tra valori calcolati e misurati (fig. da 5.23 a 5.25) si nota come il modello tende per lo più a sovrastimare le velocità in fase di flusso e a sottostimare quelle in fase di riflusso nei rii Arzere e Tentor, comportandosi invece in modo opposto per il rio di S.Margherita.

Inoltre:

- Essendo l'intensità del vento generalmente contenuta all'interno del periodo di riferimento, una stima qualitativa dei suoi effetti risulta non facile, in quanto le modifiche del comportamento osservabili nei dati rilevati sono di ridotta entità. Tale considerazione è avvalorata dalla mancata coincidenza tra la direzione dell'asse dei canali e quella della traversia principale del vento;
- Su tale base assumono validità le ipotesi sulla corretta taratura in assenza di fenomeni meteorologici di rilievo.

Alla luce di tali considerazioni, il valore $K_S = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ è stato utilizzato per i canali appartenenti alla zona di afferenza dei rii Tentor e S.Margherita, mentre il valore $K_S = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ è stato attribuito ai rii prossimi al rio dell'Arzere.

Figura 5.23: Dorsoduro - Rio dell'Arzere

Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete

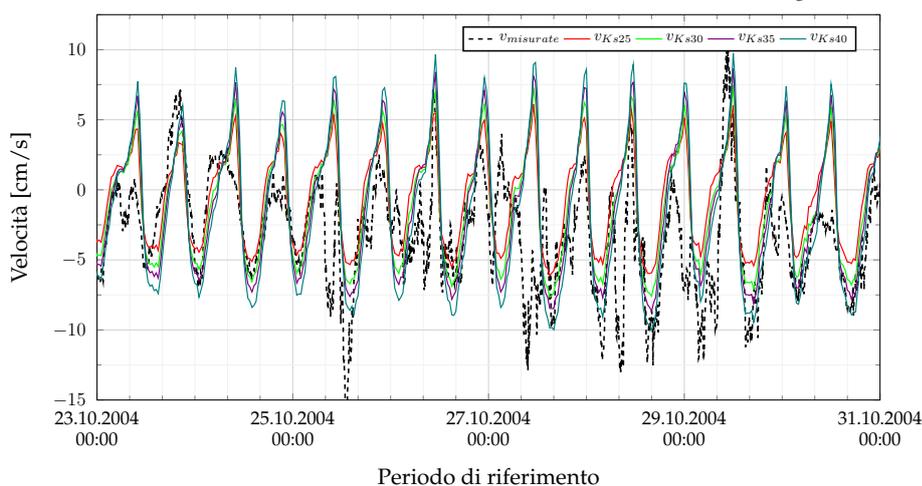
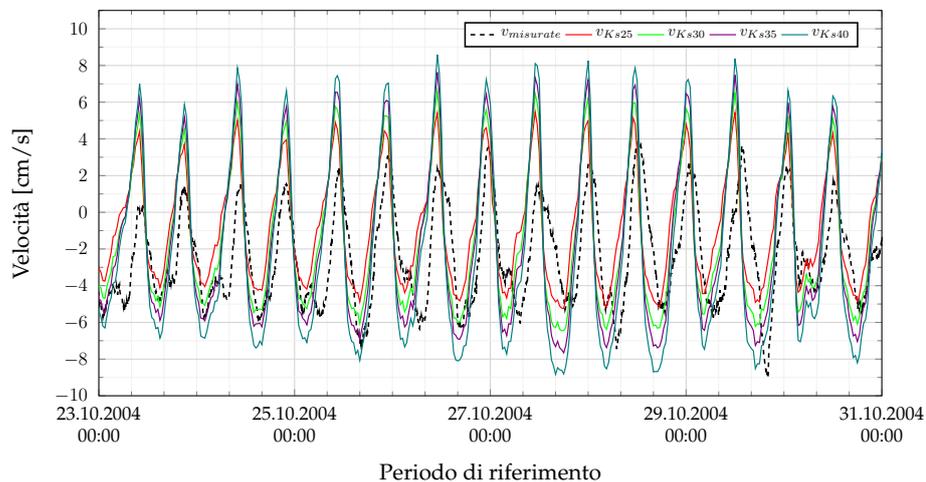
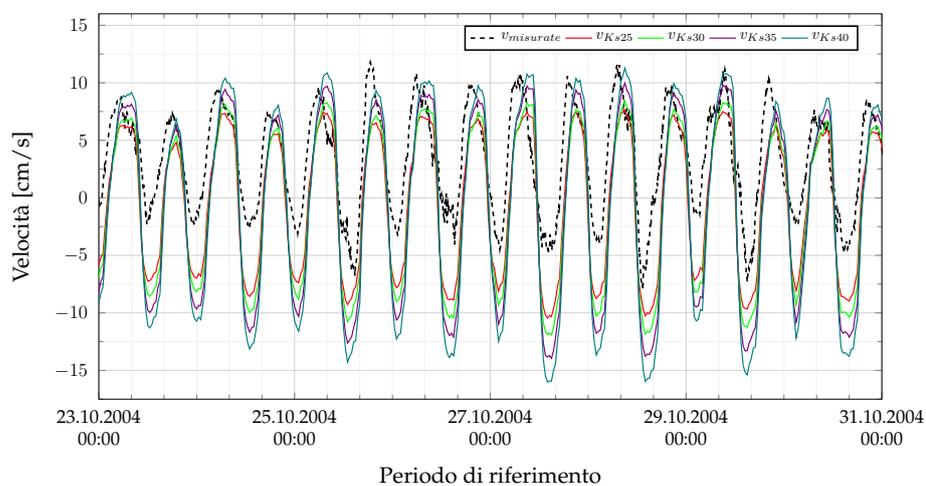
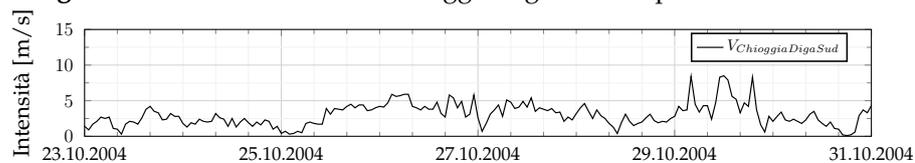


Figura 5.24: Dorsoduro - Rio del TentorConfronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete**Figura 5.25:** Dorsoduro - Rio di Santa MargheritaConfronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete**Figura 5.26:** Vento misurato a Chioggia diga Sud nel periodo Dorsoduro

5.5.3 Risultati Canali Cannaregio

I parametri statistici di correlazione e deviazione standard normalizzata ottenuti dal confronto tra i valori misurati e calcolati in questo periodo di studio sono stati riportati in fig. 5.27.

Il valore dell'errore previsionale quadratico (SSD) è stato invece riportato in Tab. 5.11.

Per tutti i parametri sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni con distribuzione uniforme della scabrezza nei canali.

Dalla loro analisi si ricavano le seguenti considerazioni:

- La correlazione (r) tra dati osservati e calcolati è compresa tra 0.00 e 0.95. Il modello presenta dunque capacità differenti di riproduzione dei valori delle velocità nei diversi canali;
- I valori della correlazione per lo stesso canale restano generalmente invariati al variare del parametro di scabrezza assegnato, fuorché per il rio del la Misericordia;
- La deviazione standard normalizzata (σ_N) è compresa tra 0.60 e 1.50. La relazione delle distribuzioni dei valori misurati e calcolati è abbastanza diversa nei vari canali;
- I valori di SSD, riportati in Tab. 5.11 evidenziano anche in questo caso la presenza di un valore di ottimo della scabrezza, per cui l'errore tende ad essere minimo. Tale effetto è ben visibile per il rio di S. Felice, in relazione al valore $K_S = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Tabella 5.11: Parametri analisi sensibilità (SSD)

K_S	San Giobbe	Misericordia	San Felice
25	84171	77849	135503
30	105720	89357	111688
35	123322	102189	106378
40	134034	110232	122367

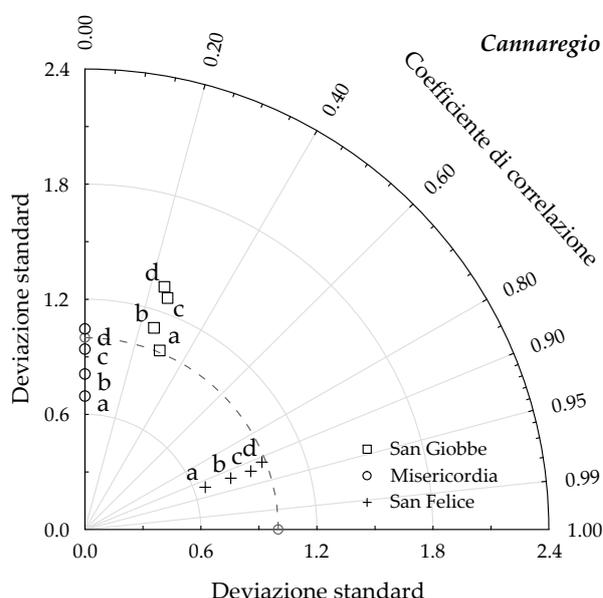


Figura 5.27: Diagramma di Taylor per le velocità nei rii: Canali zona Cannaregio.
Sono indicati: a = K_S 25; b = K_S 30; c = K_S 35; d = K_S 40

La scelta dei corretti valori di scabrezza da attribuire ai tre canali considerati in questo periodo si attiene ai criteri riportati in sezione 5.5.

Ancora una volta la correlazione è per lo più invariante per i vari dataset relativi ad un singolo rio. I valori di K_S ottimali sono dunque stati scelti considerando la distribuzione del valore della scabrezza per la quale la varianza normalizzata si avvicina di più all'unità.

Tale metodo si presenta come l'unico possibile in relazione al rio della Misericordia, per cui la correlazione calcolata risulta sempre prossima al valore nullo.

Sulla base di tali valutazioni, i valori ottimali per i singoli canali sono:

- $K_S = 25 m^{1/3}/s$ per il rio di San Giobbe;
- $K_S = 35 \div 40 m^{1/3}/s$ per il rio de la Misericordia;
- $K_S = 40 m^{1/3}/s$ per il rio di San Felice.

Dal confronto grafico tra valori calcolati e misurati (fig. da 5.28 a 5.30) si nota come il modello sia in grado di riprodurre in modo abbastanza corretto i valori delle velocità misurate solo per il rio di San Felice.

In particolare:

- In relazione al rio di San Giobbe, i valori ottenuti sottostimano quasi sempre il valore reale. Si esclude la correlazione con il solo fattore meteorologico, che contribuisce solamente ad accentuare il divario presente tra i valori calcolati e misurati. Seppur i valori delle intensità non corrispondano, non si osserva un forte sfasamento tra segnale misurato e calcolato, vista la corrispondenza temporale delle posizioni dei picchi;
- In relazione al rio della Misericordia, i valori ottenuti dal modello non rispettano quelli reali, a conferma del valore $r = 0$. La forma del grafico in questo caso non viene rispettata, sottolineando la presenza di una rilevante forzante aggiuntiva.

Alla luce di tali considerazioni sono stati attribuiti il valore $K_S = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ai rii e canali in prossimità del rio di San Giobbe, e $K_S = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ai canali in prossimità di San Felice e Misericordia.

Figura 5.28: Cannaregio - Rio di San Giobbe

Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete

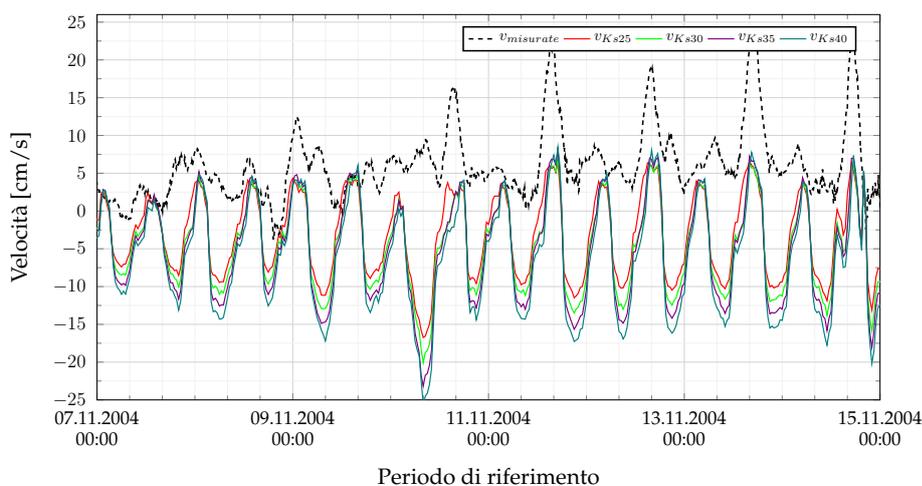
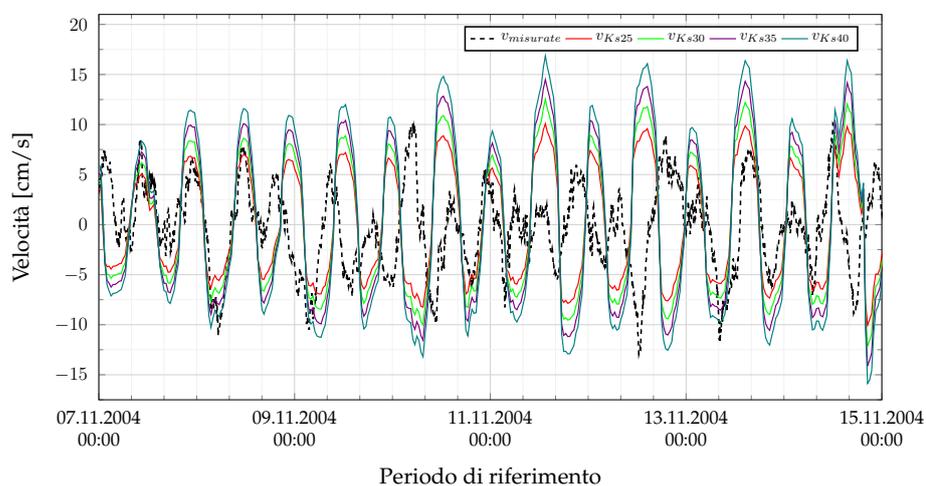
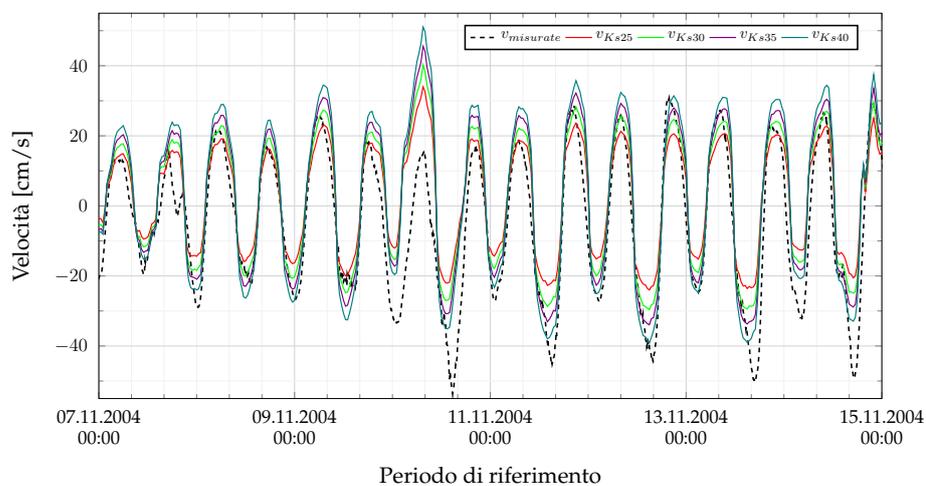
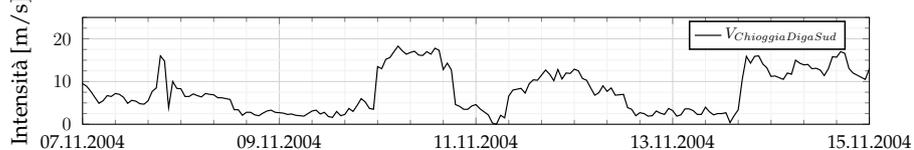


Figura 5.29: Cannaregio - Rio della MisericordiaConfronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete**Figura 5.30:** Cannaregio - Rio di San FeliceConfronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete**Figura 5.31:** Vento misurato a Chioggia diga Sud nel periodo Cannaregio

5.5.4 Risultati Canali Castello

I parametri statistici di correlazione e deviazione standard normalizzata ottenuti dal confronto tra i valori misurati e calcolati in questo periodo di studio sono stati riportati in fig. 5.32.

Il valore dell'errore previsionale quadratico (SSD) è stato invece riportato in Tab. 5.12.

Per tutti i parametri sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni con distribuzione uniforme della scabrezza nei canali.

Dalla loro analisi si ricavano le seguenti considerazioni:

- La correlazione (r) tra dati osservati e calcolati è compresa tra 0.50 e 0.80. Il modello presenta dunque capacità differenti, e in generale buone, di riproduzione dei valori delle velocità nei canali;
- I valori della correlazione per lo stesso canale restano generalmente invariati al variare del parametro di scabrezza assegnato;
- La deviazione standard normalizzata (σ_N) è compresa tra 0.60 e 1.80. Le relazioni tra le distribuzioni dei valori misurati e calcolati nei vari canali è abbastanza diversa;
- I valori di SSD, riportati in Tab. 5.12 evidenziano anche in questo caso l'incremento dell'errore in relazione alla crescita del parametro di K_S considerato.

Tabella 5.12: Parametri analisi sensibilità (SSD)

K_S	Tana	S. Isepo	Giardini
25	23240	12158	16586
30	25886	17462	28022
35	29566	24512	28675
40	35673	33067	33504

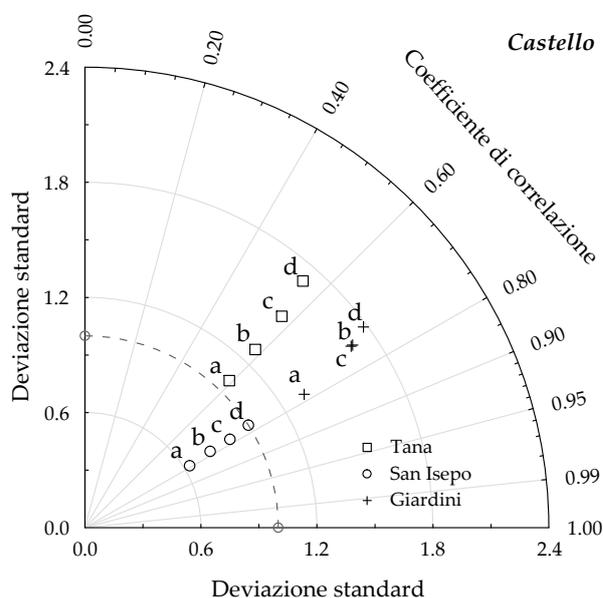


Figura 5.32: Diagramma di Taylor per le velocità nei rii: Canali zona Castello.

Sono indicati: a = K_S 25; b = K_S 30; c = K_S 35; d = K_S 40

La scelta dei corretti valori di scabrezza da attribuire ai tre canali considerati in questo periodo si attiene ai criteri riportati in sezione 5.5.

Anche in questo caso la correlazione è per lo più invariante per i vari dataset relativi ad un singolo rio, dunque i valori di K_S ottimali sono stati scelti considerando la distribuzione del valore della scabrezza per la quale la varianza normalizzata si avvicina di più all'unità.

Sulla base di tali valutazioni, i valori ottimali per i singoli canali sono:

- $K_S = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per il rio de la Tana;
- $K_S = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per il rio de Sant'Isepo;
- $K_S < 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per il rio dei Giardini.

Dal confronto grafico tra valori calcolati e misurati (fig. da 5.33 a 5.35) si nota come il modello sia in grado di riprodurre il valore e l'andamento delle velocità misurate in modo abbastanza soddisfacente, sovrastimando generalmente le velocità in fase di flusso.

In particolare:

- Per i rii dei Giardini e di Sant'Isepo il valore della velocità in fase di flusso tendono ad essere sovrastimate, mentre viene ben riprodotto l'andamento delle velocità nelle fasi di riflusso;
- Per il rio della Tana la situazione è diametralmente opposta, in quanto vengono ben riprodotti i valori e l'andamento nelle fasi di flusso a discapito di quelli nelle fasi di riflusso;
- Si nota un non trascurabile ritardo di fase tra dati misurati e calcolati per il rio dei Giardini.

Alla luce di tali considerazioni sono stati attribuiti il valore $K_S = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ai rii e canali in prossimità del rio dei Giardini, e $K_S = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ai canali in prossimità di Sant'Isepo e Tana.

Figura 5.33: Castello - Rio della Tana

Confronto delle velocità simulate con diversi valori di K_S in rete

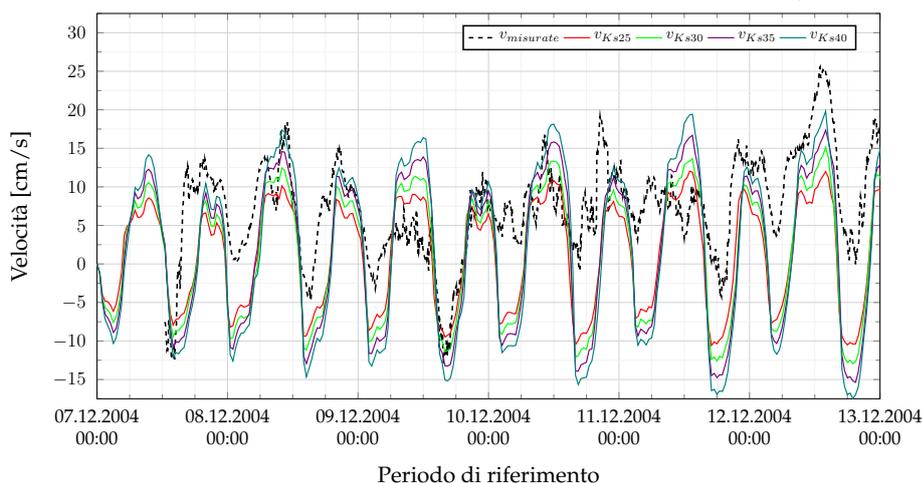
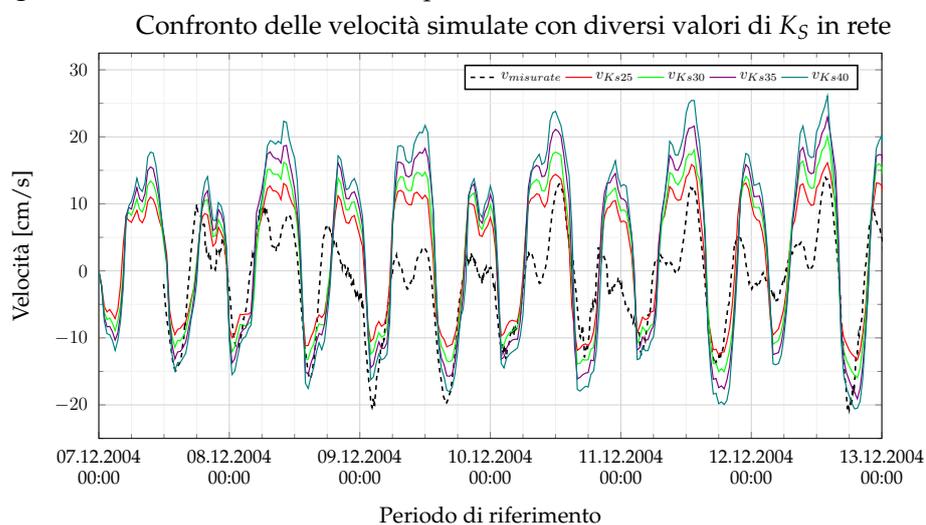
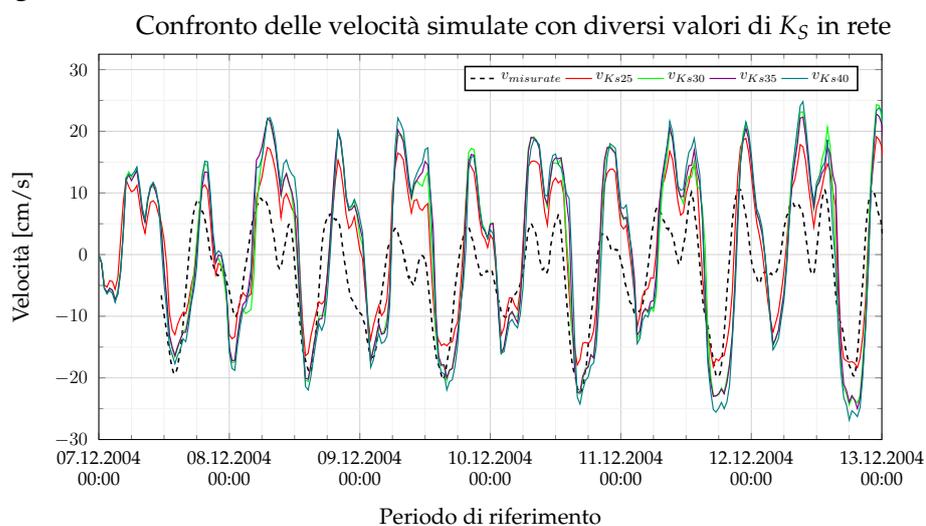
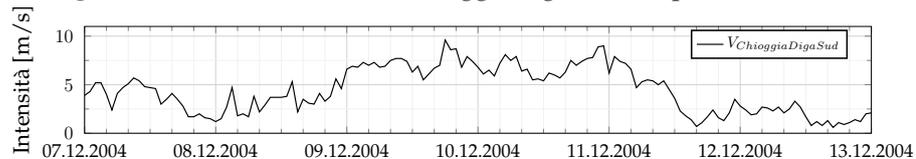


Figura 5.34: Castello - Rio di Sant'Isepo**Figura 5.35:** Castello - Rio dei Giardini**Figura 5.36:** Vento misurato a Chioggia diga Sud nel periodo Castello

5.5.5 Distribuzione non uniforme della scabrezza

Sulla base dei risultati ottenuti con le simulazioni condotte considerando valori uniformi di scabrezza per tutti i rii, sono stati individuati quelli che risultano essere i valori di K_S più opportuni per ognuna delle aree omogenee individuate all'interno della città.

Le zone omogenee considerate (fig. 5.37) e i relativi parametri di scabrezza adottati sono:

- Zona San Giobbe: $K_S = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- Zona Cannaregio: $K_S = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- Zona San Polo - San Marco: $K_S = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- Zona Santa Marta: $K_S = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- Zona Dorsoduro: $K_S = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- Zona Castello: $K_S = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- Zona Arsenale - Giardini: $K_S = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Il comportamento di alcune zone prive di canali di riferimento per il confronto è stato accomunato a quello di zone limitrofe, sulla base della similitudine geometrica dei rii presenti e dell'afferenza agli stessi canali maggiori.

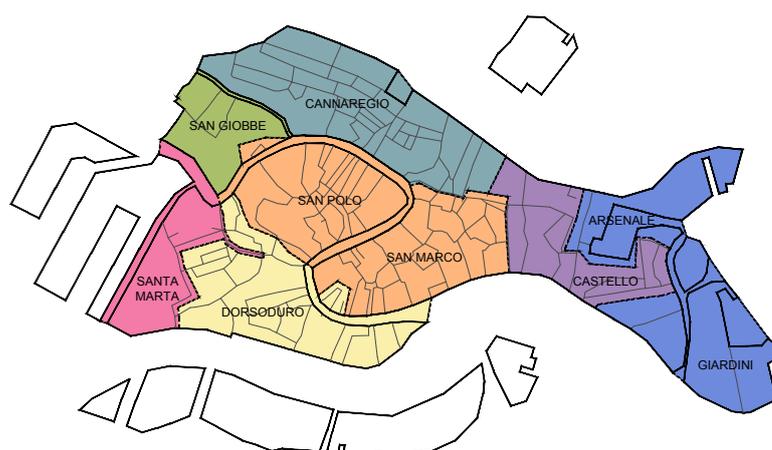


Figura 5.37: Distribuzione delle zone a scabrezza omogenea

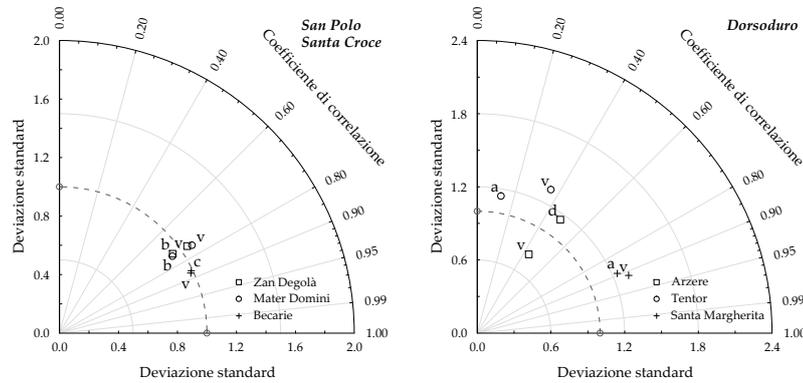


Figura 5.38: Diagramma di Taylor per le velocità: confronto ottimo - K_S variabile
Sono indicati: a = K_S 25; b = K_S 30; c = K_S 35; d = K_S 40; v = K_S variabile

Tabella 5.13: Parametri analisi sensibilità (SSD)

Rio	SSD	Δ	Rio	SSD	Δ
de S. Zan Degolà	37306	-	de l'Arzere	14579	↓
di S.Maria M.D.	16219	-	del Tentor	8036	↓
de le Becarie	17849	↓	di S. Margherita	12838	↑

Δ = variazione rispetto al caso con K_S, opt : ↑ = aumento; ↓ = diminuzione

- San Polo - Santa Croce.** Rispetto ai risultati ottenuti con K_S uniforme su tutta la città:
 Per i rii di San Zan Degolà e di S.M.M.D. migliorano i valori di correlazione e deviazione standard, mentre resta invariato l'SSD.
 Per il rio de le Becarie migliorano i valori di correlazione e SSD, mentre peggiora il valore di deviazione standard.
- Dorsoduro.** Rispetto ai risultati ottenuti con K_S uniforme su tutta la città:
 Per il rio del Tentor migliorano i valori di correlazione e SSD, mentre peggiora il valore della deviazione standard. Lo stesso accade per il rio di Santa Margherita dove anche il valore di SSD peggiora.
 Per il rio de l'Arzere il valore r rimane invariato, la posizione rispetto all'ottimo della deviazione standard viene invertita. Migliora il valore di SSD.

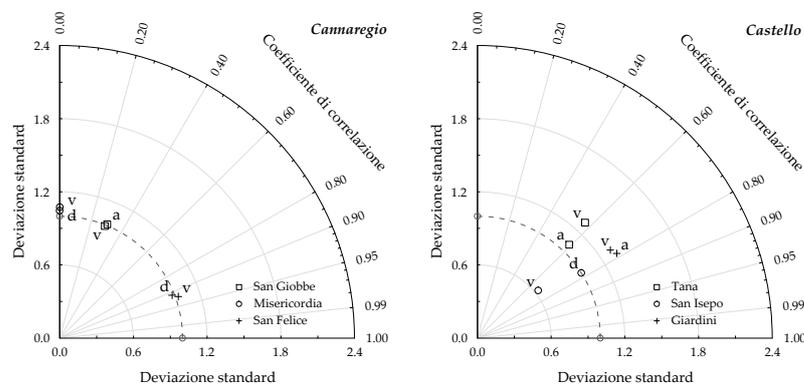


Figura 5.39: Diagramma di Taylor per le velocità: confronto ottimo - K_S variabile
Sono indicati: $a = K_S 25$; $b = K_S 30$; $c = K_S 35$; $d = K_S 40$; $v = K_S$ variabile

Tabella 5.14: Parametri analisi sensibilità (SSD)

Rio	SSD	Δ	Rio	SSD	Δ
di San Giobbe	84402	↑	de la Tana	26205	↑
de la Misericordia	116591	↑	de Sant'Isepo	12395	↓
di San Felice	112375	↓	dei Giardini	17644	↑

Δ = variazione rispetto al caso con K_S, opt : ↑ = aumento; ↓ = diminuzione

- Cannaregio.** Rispetto ai risultati ottenuti con K_S uniforme su tutta la città:
 Per il rio di San Giobbe peggiorano tutti i parametri statistici.
 Per il rio di San Felice migliorano la correlazione e l'SSD, ma peggiora la deviazione standard.
 Per il rio de la Misericordia peggiorano l'SSD e la deviazione standard, mantenendo invariata la correlazione.
- Castello.** Rispetto ai risultati ottenuti con K_S uniforme su tutta la città:
 Per il rio de la Tana peggiorano i valori di SSD e varianza, mantenendo invariata la correlazione. Lo stesso accade per il rio di S.Isepo, dove anche SSD migliora.
 Per il rio dei Giardini il valore di SSD peggiora con la correlazione e la varianza.

5.5.6 Considerazioni

L'impiego di scabrezze differenti nelle diverse zone della città comporta un seppur lieve miglioramento dei risultati ottenuti rispetto ai casi in cui queste siano uniformemente distribuite all'interno dell'intera città.

A tale scopo per i successivi studi si farà riferimento a questa distribuzione non uniforme dei valori di K_S per la caratterizzazione del comportamento idrodinamico della rete.

Si sottolinea come l'effetto legato alla variazione del K_S sembra al più influenzare il comportamento dei canali contenuti nella zona di attribuzione dello specifico parametro di scabrezza, rendendo dunque quasi del tutto indipendente la scelta di tale parametro per ogni singola zona.

Estendendo tale considerazione ai singoli canali della rete si potrebbe pensare all'attribuzione del più corretto parametro di scabrezza ad ognuno degli elementi del reticolo, caratterizzando a pieno il loro comportamento e massimizzando la veridicità dei risultati ottenuti.

Tale procedimento risulta però, oltre che estremamente oneroso dal punto di vista computazionale, anche fine a se stesso, in quanto l'estrema variabilità delle caratteristiche dei rii nel tempo renderebbe i risultati adeguati solamente per un breve lasso di tempo, oltre il quale la loro perdita di affidabilità risulterebbe non accettabile visto il forte lavoro di taratura svolto per ottenerli. A questo si aggiunge la mancanza di dati misurati per la validazione dei risultati ottenuti per i singoli canali.

Si ritiene dunque che l'impiego di una distribuzione per zone dei valori di scabrezza sia dunque più che accettabile per riprodurre l'idrodinamica dei rii interni alla città di Venezia.

Capitolo 6

Effetti del vento sulla modellazione numerica

La taratura e la verifica dei modelli numerici trattate al Capitolo 5 sono state svolte considerando periodi caratterizzati da vento di intensità trascurabile.

Questo, si ricorda, allo scopo di svincolare l'attendibilità dei risultati ottenuti dall'effetto delle forzanti meteorologiche.

Nel presente capitolo è stato quindi investigato l'effetto del vento nella modellazione numerica, per valutare la risposta del bacino lagunare nel suo complesso e dei rii interni alla città di Venezia a questa forzante meteorologica, e verificarne dunque l'importanza.

I periodi considerati per lo studio dell'effetto sulle velocità sono quelli di svolgimento dei rilievi nei 12 rii della rete cittadina, nei quali il vento risulta in più casi molto intenso (vedi Capitolo 4).

Con lo scopo di avere un dataset di maggiori dimensioni, di evitare lo svolgimento di ulteriori simulazioni e di avere gli stessi valori delle forzanti di riferimento per lo studio, questi periodi saranno impiegati anche per la valutazione degli effetti sui livelli.

6.1 Effetti del vento sui livelli

L'analisi degli effetti del vento ha lo scopo di verificare l'ammontare dell'effetto meteorologico sull'andamento dei livelli in laguna e di conseguenza sulla circolazione nei rii della città di Venezia. Verrà di conseguenza prediletto lo studio dei livelli nelle stazioni più prossime alla città, impiegando anche altre stazioni per non trascurare l'effetto sull'intera laguna.

Al fine di valutare l'influenza del vento sul calcolo dei livelli, le stazioni meteorologiche di riferimento per la raccolta dei parametri anemometrici da utilizzare per le simulazioni sono Chioggia diga Sud e Le Saline.

La loro posizione (fig. 6.1) permette di avere un chiaro riscontro sul vento agente in termini di direzione e intensità sull'intera superficie lagunare.

I metodi utilizzati sono due:

- Un'*analisi numerica* sui periodi di simulazione corrispondenti a quelli di rilievo delle velocità nei canali cittadini, basata sul calcolo e il confronto degli indicatori Nash-Sutcliffe Model Efficiency (ME) e Percentage Model Bias (PB) per i dataset legati alle diverse stazioni di riferimento, in presenza e assenza di vento;
- Un'*analisi grafica* basata sul confronto dei risultati ottenuti in presenza e assenza di vento, considerando dei periodi di simulazione ridotti, dove l'effetto del vento risulta maggiore a causa della sua maggiore intensità.

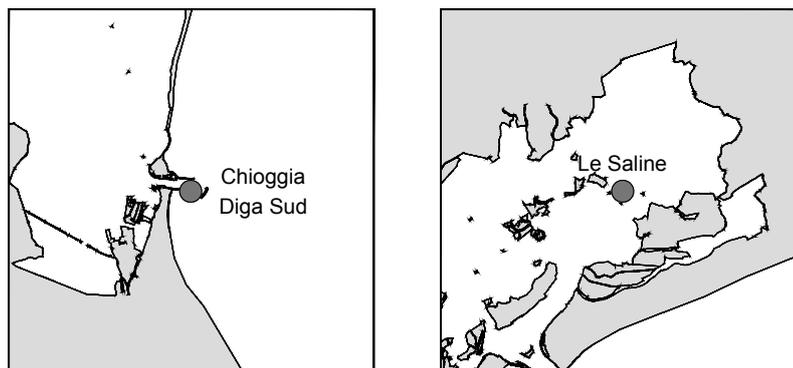


Figura 6.1: Stazioni di riferimento per la misura del vento

6.1.1 Periodo rilievi San Polo - Santa Croce

I periodi considerati sono:

- *Analisi numerica*: dalle 00:00 del 07/10/2004 alle 00:00 del 22/10/2004 (come riportato in sottosezione 4.1.3);
- *Analisi grafica*: dalle 00:00 del 11/10/2004 alle 00:00 del 13/10/2004 (fig. 6.2).

I risultati dell'analisi numerica sono riportati in Tab. 6.1, distinti in relazione alle due stazioni considerate e ai sottobacini di appartenenza.

Si osserva che:

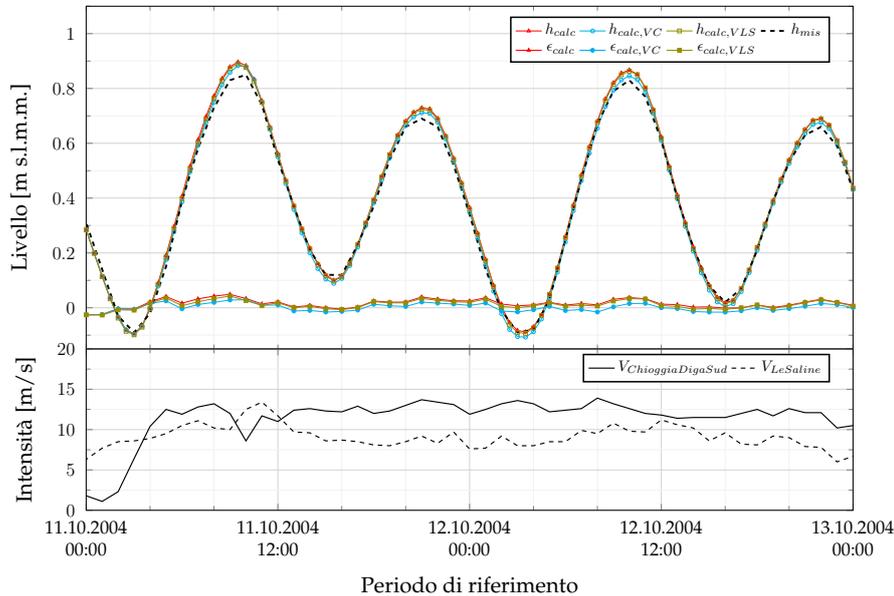
- La considerazione del vento nel calcolo dell'idrodinamica comporta quasi sempre un miglioramento del parametro ME e un peggioramento di PB rispetto al caso in cui questo non venga utilizzato;
- I risultati migliori sono ottenuti impiegando i dati forniti dalla stazione di Le Saline, in relazione ad entrambi i parametri statistici di riferimento;
- Tutti i parametri calcolati, sia per l'indice ME che per l'indice PB, ricadono indistintamente nella categoria "Eccellente" a dimostrazione dell'ottimale capacità computazionale del modello adottato.

Tabella 6.1: Parametri analisi effetto del vento - Periodo San Polo/Santa Croce

	BU	PS	LS	MU	FU	FR	CH
<i>ME</i>	0.988	0.997	0.969	0.992	0.935	0.959	0.990
<i>ME_{v,CDS}</i>	0.990	0.998	0.978	0.991	0.936	0.959	0.991
<i>ME_{v,LS}</i>	0.996	0.999	0.991	0.996	0.976	0.959	0.996
<i>PB</i>	0.90	0.04	-3.11	3.83	8.19	8.77	-1.07
<i>PB_{v,CDS}</i>	2.32	0.70	-1.27	4.67	8.12	8.72	-1.71
<i>PB_{v,LS}</i>	1.47	0.20	-2.29	4.06	7.96	8.68	-1.34

BU = Burano; PS = Punta Salute; LS = Le Saline; MU = Murano

FU = Fusina; FR = Faro Rocchetta; CH = Chioggia Vigo

Figura 6.2: Confronto livelli ed errori a Burano in funzione del vento

I risultati dell'analisi grafica sono riportati in fig. 6.2. La stazione considerata è quella di Burano, nel periodo in cui il vento agisce con maggiore intensità, dove gli effetti grafici godono di maggiore visibilità.

Si osserva che:

- I risultati ottenuti impiegando i dati anemometrici registrati a Chioggia diga Sud ricalcano in modo migliore quelli registrati nella stazione di riferimento rispetto a quelli ottenuti usando i dati registrati a Le Saline. Come conseguenza l'errore sembra essere minore. Questo è visibile soprattutto nelle vicinanze dei valori estremi (massimi e minimi);
- L'inserimento del vento non sembra comportare variazioni sui ritardi di fase dei livelli, bensì solamente sui loro valori, i quali vengono per lo più ridotti a causa dell'effetto dissipativo indotto;
- Considerando le stazioni si nota come effetti opposti vengono ottenuti in quelle posizionate agli antipodi della laguna, in proporzione a direzione e intensità del vento agente. Per esempio venti di Bora particolarmente intensi provocano un innalzamento dei livelli in laguna sud e un contemporaneo abbassamento dei livelli in laguna nord.

6.1.2 Periodo rilievi Dorsoduro

I periodi considerati sono:

- *Analisi numerica*: dalle 00:00 del 21/10/2004 alle 00:00 del 05/11/2004 (come riportato in sottosezione 4.1.4);
- *Analisi grafica*: dalle 00:00 del 31/10/2004 alle 00:00 del 02/11/2004 (fig. 6.3).

I risultati dell'analisi numerica sono riportati in Tab. 6.2, distinti in relazione alle due stazioni considerate e ai sottobacini di appartenenza.

Si osserva che:

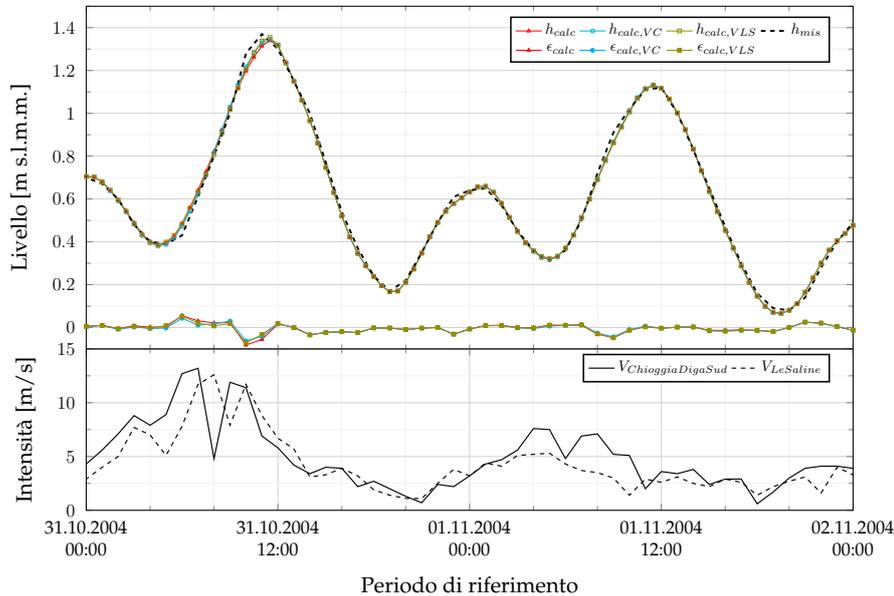
- L'inserimento del vento nel calcolo dell'idrodinamica comporta sempre un miglioramento di entrambi i parametri ME e PB rispetto al caso in cui questo non venga considerato;
- I risultati migliori sono ottenuti dall'impiego dei dati forniti dalla stazione di Le Saline in relazione al parametro ME, e dalla stazione di Chioggia diga Sud in relazione al parametro PB;
- Tutti i parametri calcolati, sia per l'indice ME che per l'indice PB, ricadono indistintamente nella categoria "Eccellente" a dimostrazione dell'ottimale capacità computazionale del modello adottato.

Tabella 6.2: Parametri analisi effetto del vento - Periodo simulazione Dorsoduro

	BU	PS	LS	MU	FU	FR	CH
<i>ME</i>	0.985	0.997	0.982	0.992	0.954	0.971	0.996
<i>ME_{v,CDS}</i>	0.986	0.998	0.983	0.993	0.955	0.971	0.996
<i>ME_{v,LS}</i>	0.994	0.999	0.994	0.997	0.983	0.971	0.998
<i>PB</i>	-0.58	0.51	-0.89	3.93	6.80	7.94	1.62
<i>PB_{v,CDS}</i>	-0.49	0.49	-0.70	3.93	6.69	7.90	1.56
<i>PB_{v,LS}</i>	-0.51	0.50	-0.78	3.92	6.73	7.91	1.57

BU = Burano; PS = Punta Salute; LS = Le Saline; MU = Murano

FU = Fusina; FR = Faro Rocchetta; CH = Chioggia Vigo

Figura 6.3: Confronto livelli ed errori a Punta della Salute in funzione del vento

I risultati dell'analisi grafica sono riportati in fig. 6.3. La stazione considerata è quella di Punta della Salute, dove gli effetti grafici godono di maggiore visibilità.

Si osserva che:

- In questo caso gli effetti indotti dal vento sono estremamente contenuti per tutte le stazioni di riferimento. Si nota però che la presenza del vento di intensità rilevante, superiore ai 5 m/s , comporta in generale un miglioramento del valore dei dati calcolati in relazione a quelli misurati, con effetti comuni a tutte le stazioni mareografiche. L'errore risulta dunque per lo più diminuito. Gli effetti sono visibili sia nelle fasi di picco che in quelle di crescita;
- Anche in questo caso si nota come effetti opposti e proporzionati all'intensità del vento agente, siano ottenuti nelle stazioni posizionate agli antipodi della laguna.

6.1.3 Periodo rilievi Cannaregio

I periodi considerati sono:

- *Analisi numerica*: dalle 00:00 del 04/11/2004 alle 00:00 del 26/11/2004 (come riportato in sottosezione 4.1.5);
- *Analisi grafica*: dalle 00:00 del 10/11/2004 alle 00:00 del 12/11/2004 (fig. 6.4).

I risultati dell'analisi numerica sono riportati in Tab. 6.3, distinti in relazione alle due stazioni considerate e ai sottobacini di appartenenza.

Si osserva che:

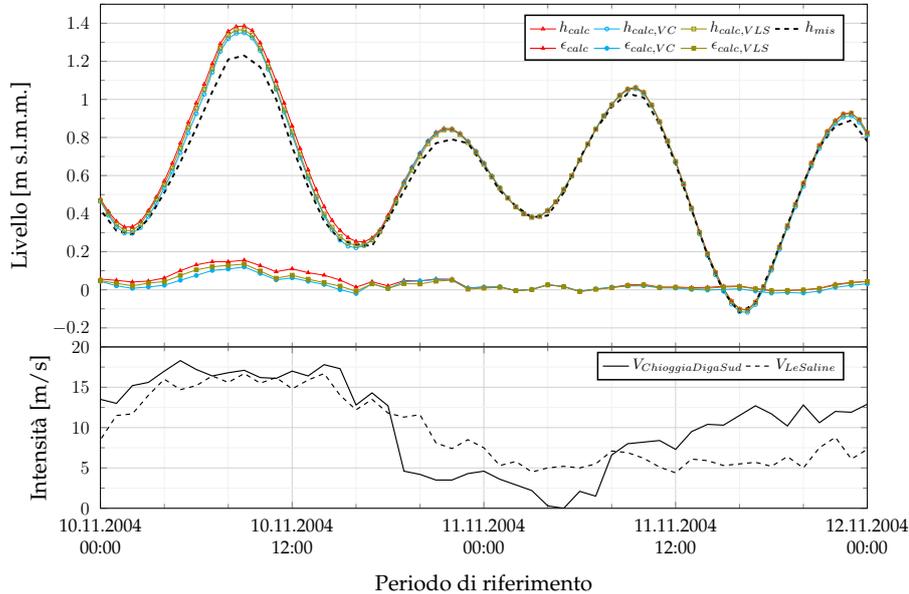
- La considerazione del vento nel calcolo dell'idrodinamica comporta sempre un miglioramento del parametro ME e quasi sempre di PB rispetto al caso in cui questo non venga utilizzato;
- I risultati migliori sono ottenuti dall'impiego dei dati della stazione di Le Saline in relazione al parametro ME. Il parametro PB migliora in 4 stazioni su 7 con riferimento ai dati di Chioggia diga Sud;
- Quasi tutti i parametri calcolati, sia per l'indice ME che per l'indice PB, ricadono nella categoria "Eccellente" a dimostrazione dell'ottimale capacità computazionale del modello adottato.

Tabella 6.3: Parametri analisi effetto del vento - Periodo simulazione Cannaregio

	BU	PS	LS	MU	FU	FR	CH
<i>ME</i>	0.898	0.993	0.957	0.992	0.965	0.969	0.987
<i>ME_{v,CDS}</i>	0.926	0.996	0.974	0.993	0.965	0.970	0.992
<i>ME_{v,LS}</i>	0.952	0.997	0.986	0.996	0.981	0.969	0.994
<i>PB</i>	-13.89	-2.61	-5.45	1.38	5.51	4.18	3.06
<i>PB_{v,CDS}</i>	-11.52	-1.57	-2.75	2.73	5.65	4.19	2.15
<i>PB_{v,LS}</i>	-12.69	-2.17	-3.99	1.96	5.41	4.14	2.57

BU = Burano; PS = Punta Salute; LS = Le Saline; MU = Murano

FU = Fusina; FR = Faro Rocchetta; CH = Chioggia Vigo

Figura 6.4: Confronto livelli ed errori a Punta della Salute in funzione del vento

I risultati dell'analisi grafica sono riportati in fig. 6.4. La stazione considerata è quella di Punta della Salute, dove gli effetti grafici godono di maggiore visibilità.

Si osserva che:

- Anche in questo caso i risultati ottenuti impiegando i dati misurati a Chioggia diga Sud sono migliori rispetto a quelli ottenuti usando i dati della stazione di Le Saline. In particolar modo nelle prime 24 ore del grafico questo effetto risulta particolarmente visibile nelle posizioni di picco, vista la maggiore intensità del vento agente. L'andamento dell'errore dimostra la veridicità di tale considerazione;
- Come è giusto aspettarsi, le maggiori differenze tra valori misurati e calcolati sono ottenuti nelle posizioni in cui il vento agisce con maggiore intensità;
- Ancora una volta si nota come effetti opposti e proporzionati all'intensità del vento agente, siano ottenuti nelle stazioni posizionate agli antipodi della laguna.

6.1.4 Periodo rilievi Castello

I periodi considerati sono:

- *Analisi numerica*: dalle 00:00 del 07/12/2004 alle 00:00 del 13/12/2004 (come riportato in sottosezione 4.1.6);
- *Analisi grafica*: dalle 00:00 del 10/12/2004 alle 00:00 del 12/12/2004 (fig. 6.5).

I risultati dell'analisi numerica sono riportati in Tab. 6.4, distinti in relazione alle due stazioni considerate e ai sottobacini di appartenenza.

Si osserva che:

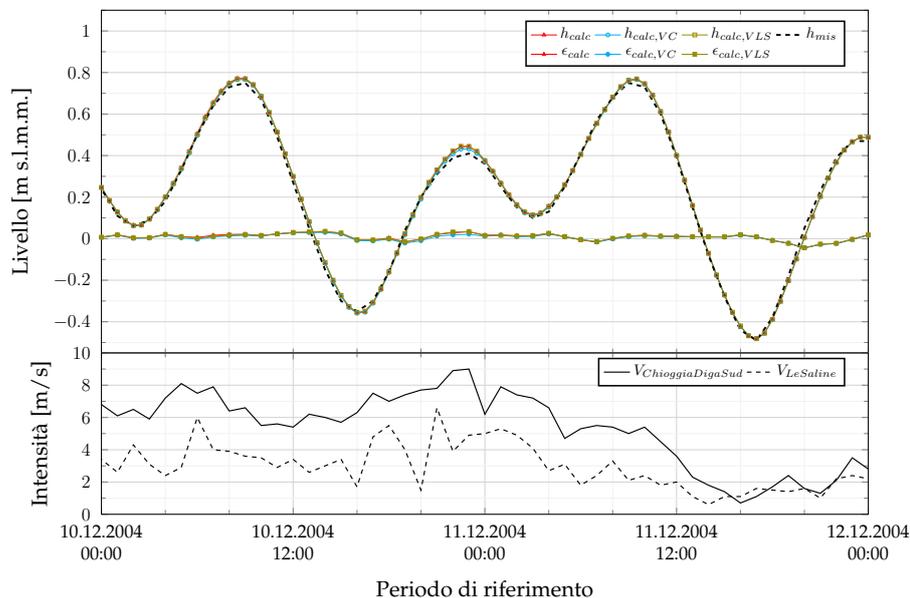
- La considerazione del vento nel calcolo dell'idrodinamica comporta quasi sempre un miglioramento del parametro PB e un miglioramento o un'invarianza del parametro ME;
- In questo caso per le stazioni di Le Saline e Chioggia diga Sud si registrano sia dei miglioramenti che dei peggioramenti nei parametri statistici di riferimento;
- Quasi tutti i parametri calcolati, sia per l'indice ME che per l'indice PB, ricadono nella categoria "Eccellente" a dimostrazione dell'ottimale capacità computazionale del modello adottato.

Tabella 6.4: Parametri analisi effetto del vento - Periodo simulazione Castello

	BU	PS	LS	MU	FU	FR	CH
<i>ME</i>	0.937	0.917	0.919	0.923	0.895	0.879	0.916
<i>ME_{v,CDS}</i>	0.938	0.917	0.920	0.922	0.895	0.879	0.917
<i>ME_{v,LS}</i>	0.938	0.917	0.919	0.923	0.896	0.879	0.916
<i>PB</i>	-9.13	-7.89	-10.79	-1.39	6.81	14.16	0.18
<i>PB_{v,CDS}</i>	-7.77	-6.99	-9.24	-0.36	7.29	14.35	-0.39
<i>PB_{v,LS}</i>	-8.90	-7.82	-10.48	-1.30	6.78	14.10	0.06

BU = Burano; PS = Punta Salute; LS = Le Saline; MU = Murano

FU = Fusina; FR = Faro Rocchetta; CH = Chioggia Vigo

Figura 6.5: Confronto livelli ed errori a Punta della Salute in funzione del vento

I risultati dell'analisi grafica sono riportati in fig. 6.5. La stazione considerata è quella di Burano, dove gli effetti grafici godono di maggiore visibilità.

Si osserva che:

- Anche in questo caso le variazioni dovute agli effetti del vento sono molto poco evidenti.
Nel picco a cavallo tra l'11/12 e il 12/12 si nota come il risultato migliore sia stato ottenuto con impiego dei dati misurati dalla stazioni di Chioggia diga Sud, sottolineato anche dal minor valore dell'errore in prossimità di tale periodo;
- Come sempre si nota come effetti opposti e proporzionati all'intensità del vento agente, siano ottenuti nelle stazioni posizionate agli antipodi della laguna.

6.2 Effetti del vento sulle velocità

Come già riportato in sezione 6.1 l'effetto del vento sulla propagazione dei livelli di marea nella laguna comporta una modifica del comportamento delle velocità all'interno dei canali della città di Venezia.

Com'è noto, il flusso nei rii è governato dai piccoli gradienti di livello che si formano tra le varie parti della città. Una seppur piccola modifica di questi gradienti può comportare dunque variazioni alquanto vistose sull'ammontare delle velocità di deflusso.

Lo studio degli effetti sulle velocità, legati all'inserimento del vento nel calcolo numerico, sono stati studiati al pari degli effetti sui livelli:

- Attraverso un'*analisi numerica* dei risultati ottenuti sui singoli canali nei vari periodi di simulazione utilizzando l'indicatore statistico SSD (errore previsionale quadrato) basandosi dunque sulla comparazione dei parametri di errore, varianza e correlazione;
- Attraverso un'*analisi grafica* dei risultati ottenuti nei singoli canali considerando l'intero periodo di riferimento.

La stazione di riferimento per i dati anemometrici è quella di Chioggia diga Sud.

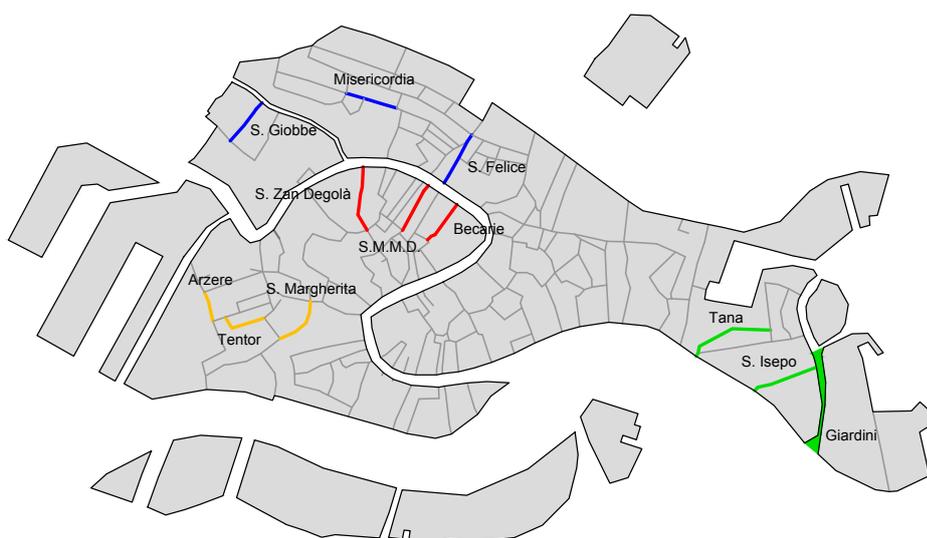


Figura 6.6: Localizzazione dei canali interessati dalle misure delle velocità

6.2.1 Periodo rilievi San Polo - Santa Croce

I periodi di riferimento per lo svolgimento della simulazione e dei rilievi nei canali sono riportati nella sottosezione 4.1.3.

L'analisi dei valori dei parametri statistici calcolati, riportati in Tab. 6.5 e fig. 6.7, porta alle seguenti considerazioni:

- Per tutti i canali, il maggior valore del parametro di errore previsionale quadratico (SSD) è stato ottenuto nella simulazione in cui il vento agente a Chioggia diga Sud è stato inserito come forzante aggiuntiva nelle equazioni risolutive. Pur non essendo il valore di molto superiore rispetto a quello calcolato in assenza di vento, questo sembra comportare una generale diminuzione delle capacità previsionali e di calcolo del modello adottato;
- L'inserimento del vento tra le forzanti comporta un seppur piccolo miglioramento dei parametri statistici di correlazione (r) e varianza (σ_N) (vedi fig. 6.7).

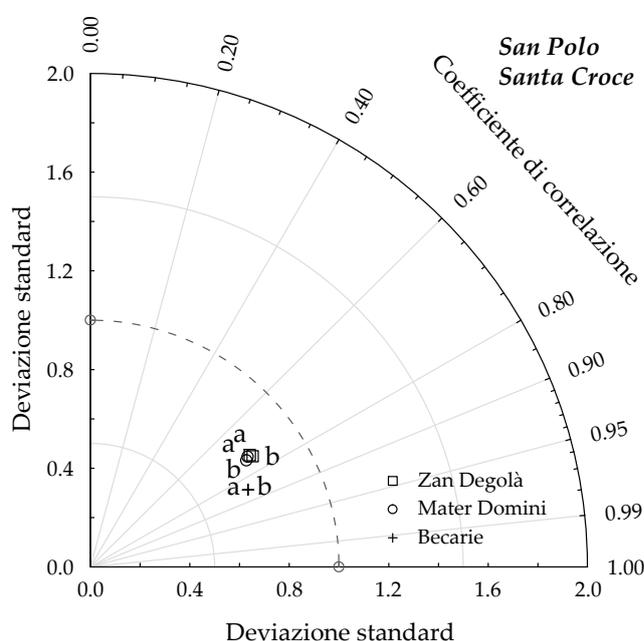


Figura 6.7: Diagramma di Taylor per le velocità: zona San Polo - Santa Croce.

Sono indicati: a = no vento; b = vento Chioggia.

Tabella 6.5: Parametri analisi sensibilità (SSD)

	S. Zan Degolà	S.Maria M.D.	Becarie
No Vento	36409	14870	17378
Vento Chioggia	37991	15458	18588

Dal punto di vista grafico i risultati ottenuti sono riportati nelle fig. da 6.8 a 6.10, dove in rosso si riportano i valori calcolati non considerando il vento, in blu i valori ottenuti considerando il vento.

La loro analisi porta alle seguenti considerazioni:

- In tutti i canali considerati le fasi dei valori calcolati e misurati risultano per lo più coincidenti, sia in presenza che in assenza del vento nei parametri iniziali di simulazione. Di conseguenza lo sfasamento temporale dei picchi nelle diverse configurazioni risulta abbastanza ridotto;

- I valori delle velocità calcolate e misurate nei singoli canali non sono mai perfettamente coincidenti.

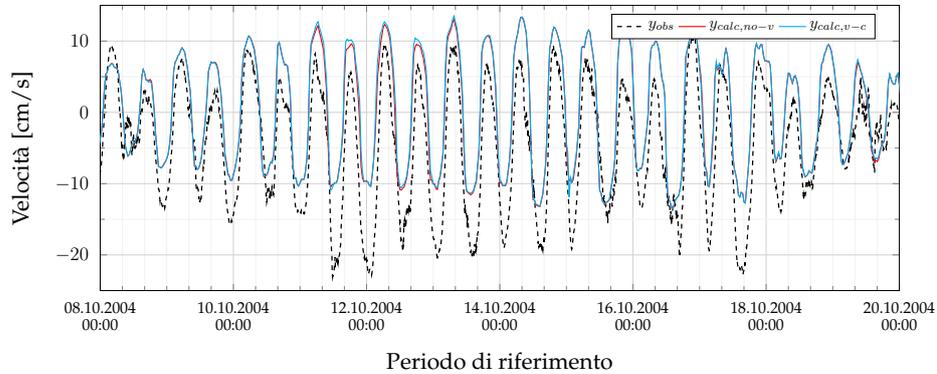
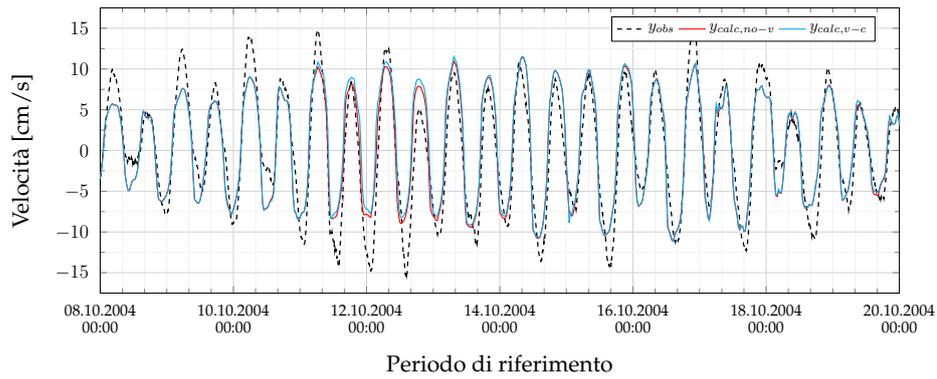
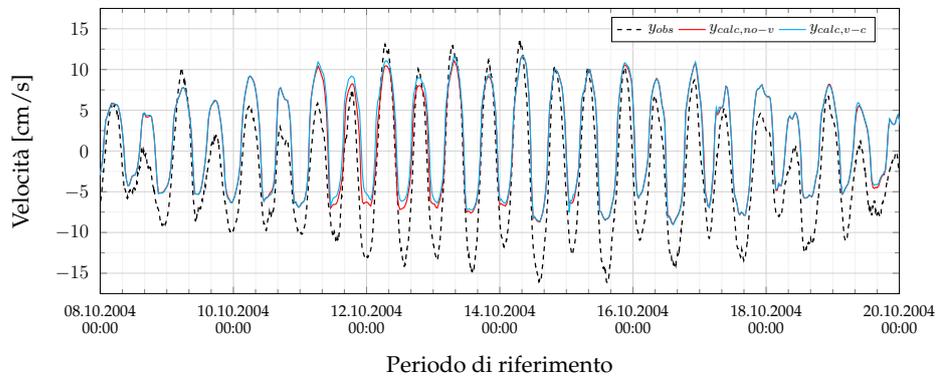
Una buona coincidenza si ottiene in quasi tutto il periodo di studio per il rio di S. Maria Mater Domini, sia per i valori dei colmi che per i cavi.

Per il rio de le Becarie la maggiore corrispondenza si osserva nei valori dei colmi, ossia nelle fasi di flusso, mentre nelle fasi di riflusso i valori sono sempre sottostimati dal modello numerico.

Per il rio di San Zan Degolà la corrispondenza è infine inferiore agli altri casi, in quanto né il valore dei picchi, né quello dei cavi risulta rispettato se non in poche occasioni;

- In tutti e tre i canali considerati l'inserimento del vento come forzante aggiuntiva nelle equazioni risolutive comporta un ridotto miglioramento della corrispondenza tra valori calcolati e misurati delle velocità. Le variazioni maggiori si riscontrano nei periodi di maggiore intensità del vento.

La presente simulazione gode di una buona capacità di rappresentazione delle velocità all'interno dei canali.

Figura 6.8: Confronto velocità calcolate-misurate: rio San Zan Degolà**Figura 6.9:** Confronto velocità calcolate-misurate: rio S.M.M.D.**Figura 6.10:** Confronto velocità calcolate-misurate: rio de le Becarie

6.2.2 Periodo rilievi Dorsoduro

I periodi di riferimento per lo svolgimento della simulazione e dei rilievi nei canali sono riportati nella sottosezione 4.1.4.

L'analisi dei valori dei parametri statistici calcolati, riportati in Tab. 6.6 e fig. 6.11, porta alle seguenti considerazioni:

- In questo caso l'inserimento del vento agente a Chioggia diga Sud come forzante aggiuntiva comporta un incremento del parametro SSD per i rii del Tentor e di S. Margherita. Si assiste invece ad una seppur contenuta diminuzione per il rio dell'Arzere. Le capacità di previsione dei tre canali sono dunque modificate in modo diverso;
- Per tutti e tre i rii si assiste inoltre ad un miglioramento dei parametri statistici di correlazione (r) e varianza (σ_N) all'inserimento del vento (vedi fig. 6.11).

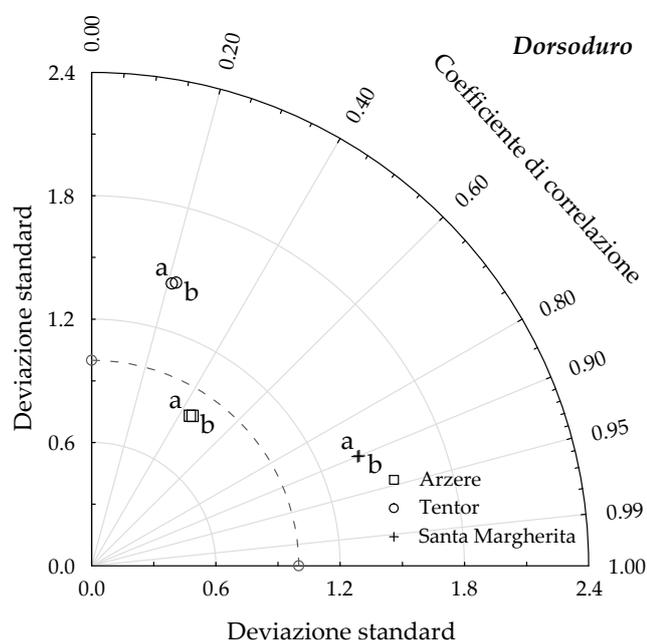


Figura 6.11: Diagramma di Taylor per le velocità: Canali zona Dorsoduro. Sono indicati: a = no vento; b = vento Chioggia.

Tabella 6.6: Parametri analisi sensibilità (SSD)

	Arzere	Tentor	S. Margherita
No Vento	14484	9898	14466
Vento Chioggia	14307	10058	14492

Dal punto di vista grafico i risultati ottenuti sono riportati nelle fig. da 6.12 a 6.14, dove in rosso si riportano i valori calcolati non considerando il vento, in blu i valori ottenuti considerando il vento.

La loro analisi porta alle seguenti considerazioni:

- In questo caso la corrispondenza in termini di fase non è ottimale, in quanto solo per il rio dell'Arzere sembra essere rispettata. La simulazione restituisce dei valori anticipati nel rio del Tentor e ritardati nel rio di S. Margherita rispetto ai dati misurati;

- I valori delle velocità calcolate e misurate nei singoli canali non sono mai perfettamente coincidenti.

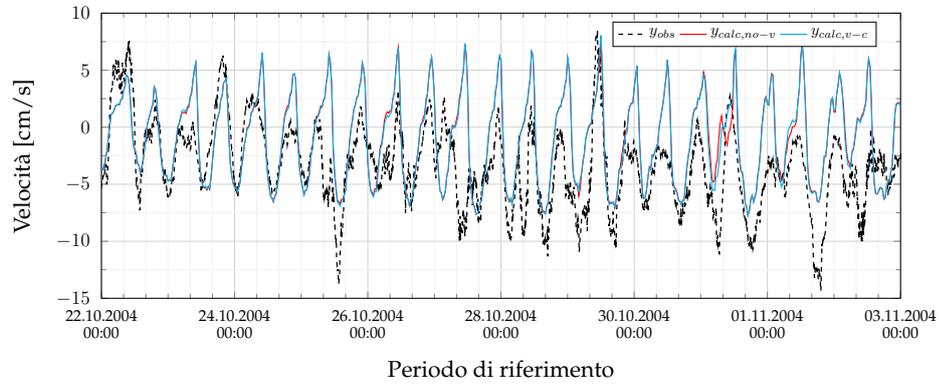
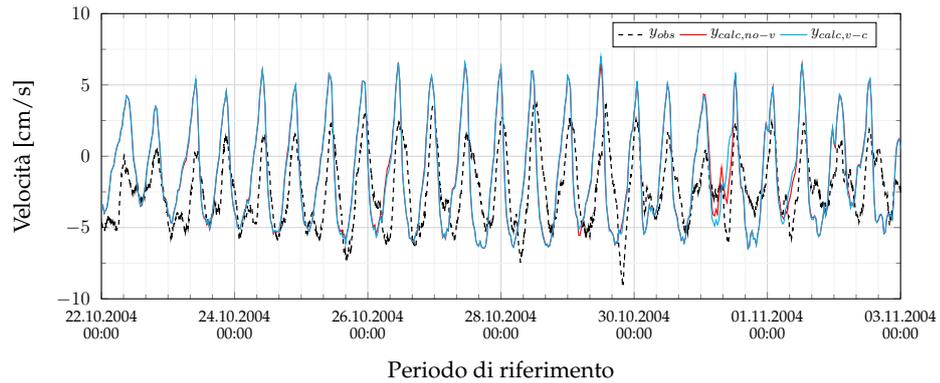
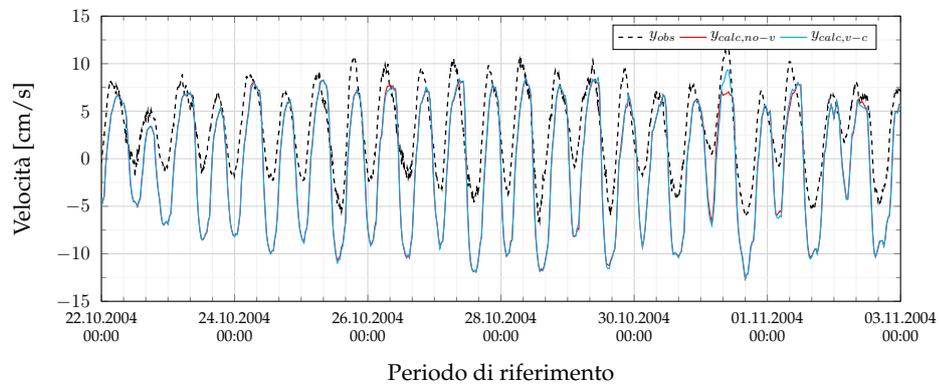
Per il rio dell'Arzere la corrispondenza è bassa, in quanto i dati misurati soffrono la presenza di forti disturbi. L'impiego di una media mobile ad intervallo maggiore non porta se non dei minimi miglioramenti.

Per il rio del Tentor la corrispondenza si ha solamente per i cavi, nelle fasi di riflusso, mentre è molto marcata la differenza nelle fasi di flusso.

Diametralmente opposto è il comportamento a cui si assiste nel rio di Santa Margherita, dove i migliori risultati sono ottenuti in corrispondenza dei colmi;

- In tutti e tre i canali il miglioramento ottenuto con l'inserimento del vento come forzante aggiuntiva è molto basso e in alcuni casi praticamente impercettibile.

La capacità rappresentativa in questo periodo di simulazione è dunque da considerarsi accettabile, seppur non ottimale.

Figura 6.12: Confronto velocità calcolate-misurate: rio dell'Arzere**Figura 6.13:** Confronto velocità calcolate-misurate: rio del Tentor**Figura 6.14:** Confronto velocità calcolate-misurate: rio di Santa Margherita

6.2.3 Periodo rilievi Cannaregio

I periodi di riferimento per lo svolgimento della simulazione e dei rilievi nei canali sono riportati alla sottosezione 4.1.5.

L'analisi dei valori dei parametri statistici calcolati, riportati in Tab. 6.7 e fig. 6.15, porta alle seguenti considerazioni:

- In questo caso l'inserimento del vento agente a Chioggia diga Sud come forzante aggiuntiva comporta un incremento del parametro SSD per i rii di S. Giobbe e della Misericordia. Si assiste invece ad una seppur contenuta diminuzione per il rio di S. Felice. Le capacità di previsione legate ai tre canali sono dunque tra loro diverse;
- Il comportamento dei parametri statistici di correlazione (r) e varianza (σ_N), all'inserimento del vento, è molto diverso nei tre canali. Mentre la varianza migliora in tutti e tre i casi, la correlazione migliora per S. Felice, peggiora per S. Giobbe e rimane invariata per Misericordia (vedi fig. 6.15).

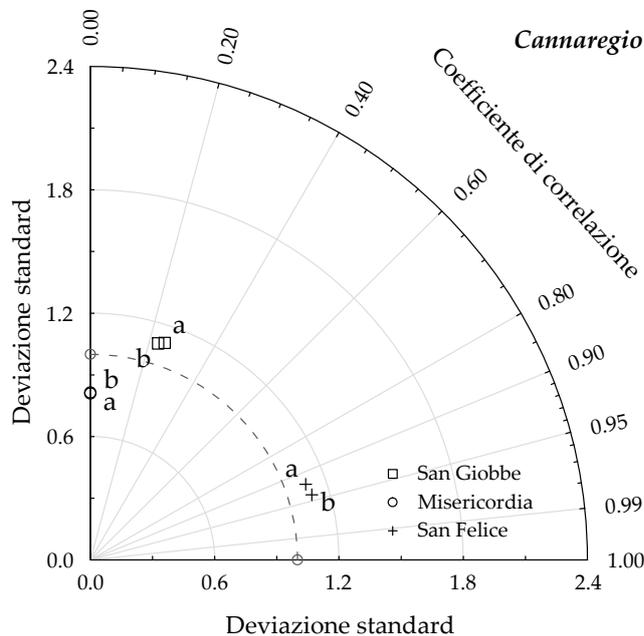


Figura 6.15: Diagramma di Taylor per le velocità: Canali zona Cannaregio.

Sono indicati: a = no vento; b = vento Chioggia.

Tabella 6.7: Parametri analisi sensibilità (SSD)

	S. Giobbe	Misericordia	S. Felice
No Vento	105720	89357	111688
Vento Chioggia	110454	89915	87597

Dal punto di vista grafico i risultati ottenuti sono riportati nelle fig. da 6.16 a 6.18, dove in rosso si riportano i valori calcolati non considerando il vento, in blu i valori ottenuti considerando il vento.

La loro analisi porta alle seguenti considerazioni:

- La corrispondenza in fase nella presente simulazione viene rispettata in modo quasi perfetto solamente per il rio di S. Felice. Una buona corrispondenza sembra esserci anche per il rio di San Giobbe, seppur solo in termini di fase. Per il rio della Misericordia, seppur i dati siano affetti da forte rumore, si nota come alcune fasi siano ben rispettate;

- I valori delle velocità calcolate e misurate nei singoli canali non sono mai perfettamente coincidenti.

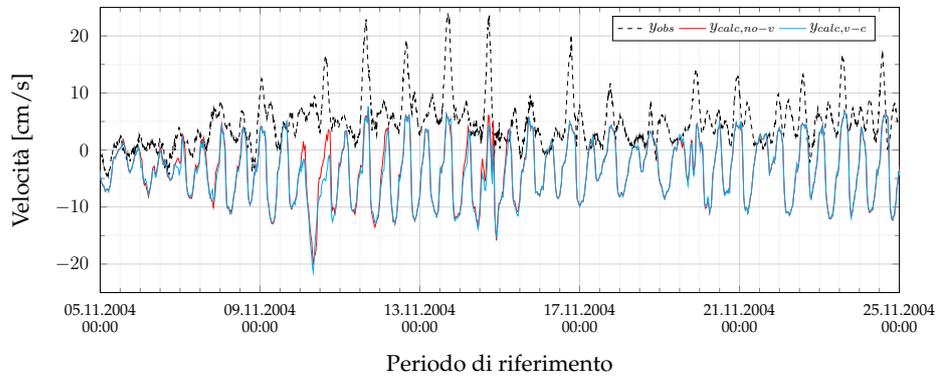
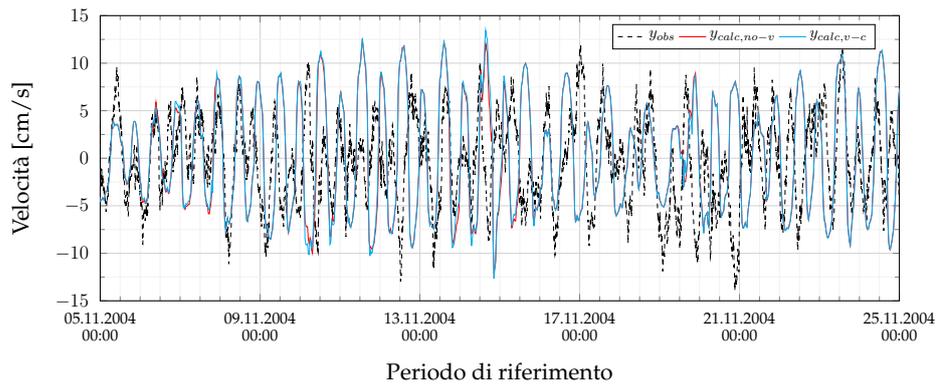
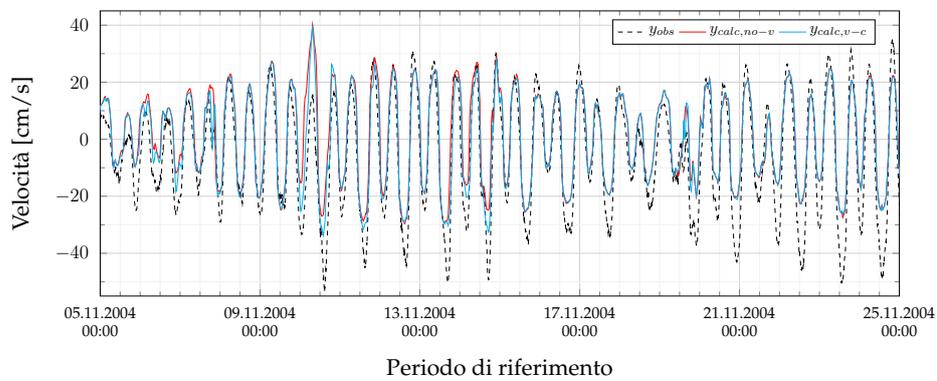
Per il rio di S. Giobbe la corrispondenza è praticamente nulla, in quanto i risultati misurati si discostano in modo netto da quelli calcolati. Si nota come questo scostamento sia per lo più costante, e quindi dovuto forse ad una forzante aggiuntiva non adeguatamente tenuta in considerazione.

Per il rio della Misericordia la forte presenza di disturbi nei valori misurati non può condurre ad un'adeguata valutazione delle capacità previsionali del modello, seppur si nota come i valori delle intensità misurate e calcolate siano mediamente coincidenti.

La rappresentazione delle velocità per il rio di S. Felice è invece ottimale, seppur sia in fase di flusso che di riflusso si assiste ad una generale sottostima delle velocità;

- In tutti i casi l'impiego del vento comporta un leggero miglioramento della capacità previsionale del modello.

La capacità rappresentativa della presente simulazione non è dunque da ritenersi ottimale, se non per il rio di San Felice.

Figura 6.16: Confronto velocità calcolate-misurate: rio di San Giobbe**Figura 6.17:** Confronto velocità calcolate-misurate: rio della Misericordia**Figura 6.18:** Confronto velocità calcolate-misurate: rio di San Felice

6.2.4 Periodo rilievi Castello

I periodi di riferimento per lo svolgimento della simulazione e dei rilievi nei canali sono riportati alla sottosezione 4.1.6.

L'analisi dei valori dei parametri statistici calcolati, riportati in Tab. 6.8 e fig. 6.19, porta alle seguenti considerazioni:

- In questo caso l'inserimento del vento agente a Chioggia diga Sud come forzante aggiuntiva comporta un incremento del parametro SSD solamente per il rio della Tana. Si assiste invece ad una forte diminuzione sia per il rio di S. Isepo che per il rio dei Giardini. Le capacità di previsione legate ai tre canali sono dunque tra loro diverse;
- L'inserimento del vento come forzante aggiuntiva comporta un miglioramento del valore dei parametri statistici di correlazione (r) e varianza (σ_N) per tutti e tre i canali considerati (vedi fig. 6.19).

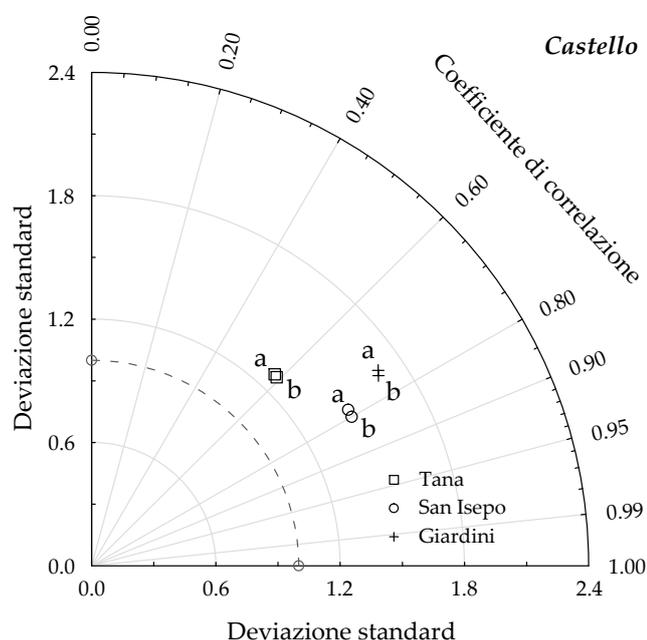


Figura 6.19: Diagramma di Taylor per le velocità: Canali zona Castello. Sono indicati: a = no vento; b = vento Chioggia.

Tabella 6.8: Parametri analisi sensibilità (SSD)

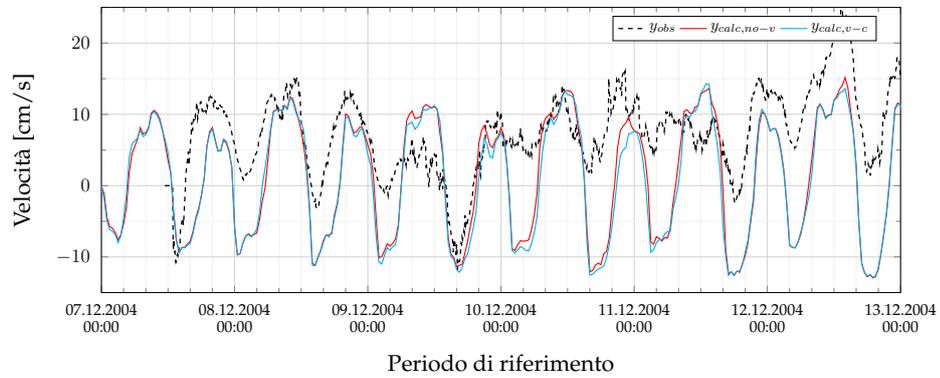
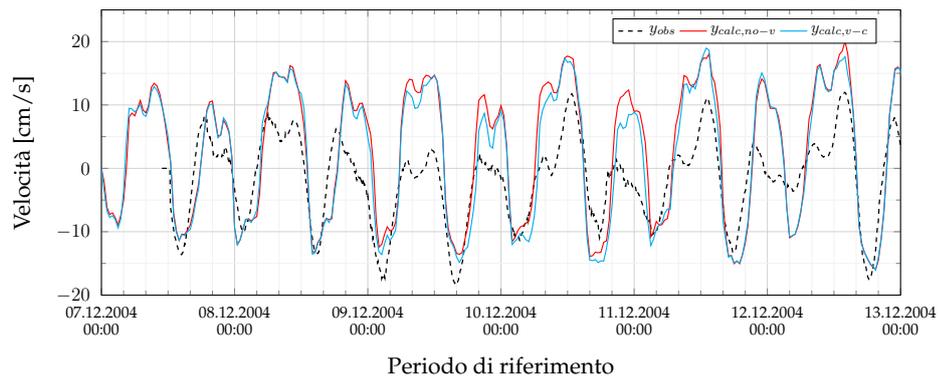
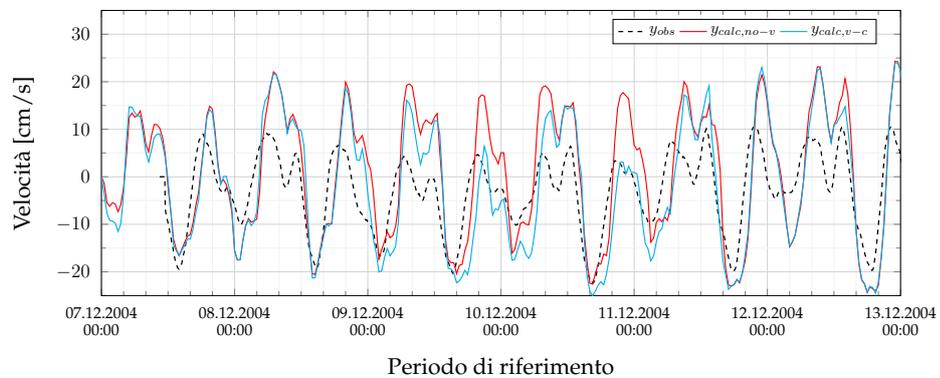
	Tana	S. Isepo	Giardini
No Vento	25886	17462	28022
Vento Chioggia	27758	15003	24109

Dal punto di vista grafico i risultati ottenuti sono riportati nelle fig. da 6.20 a 6.22, dove in rosso si riportano i valori calcolati non considerando il vento, in blu i valori ottenuti considerando il vento.

La loro analisi porta alle seguenti considerazioni:

- La corrispondenza tra le fasi misurate e calcolate nei canali considerati non è sempre ottimale. Nei rii della Tana e di Sant'Isepo questa viene per lo più ottenuta, mentre per il rio dei Giardini si assiste ad un generale ritardo dei valori calcolati rispetto a quelli misurati;
- I valori delle velocità calcolate e misurate nei singoli canali non sono mai perfettamente coincidenti.
Per il rio della Tana la corrispondenza tra valori calcolati e misurati è abbastanza buona in alcuni punti, seppur in diverse posizioni la presenza di forti disturbi nelle misurazioni non permetta un'ottima valutazione delle capacità rappresentative del modello.
Per il rio di S. Isepo si ha una buona corrispondenza dei valori nelle posizioni di cavo e una generale sovrastima dei valori misurati nelle posizioni di colmo.
Pari considerazione può essere fatta per il rio dei Giardini, dove la sovrastima è presente solo nelle fasi di flusso, ottenendo buoni risultati nelle fasi di riflusso;
- In questo caso l'inserimento del vento comporta un generale peggioramento dei risultati calcolati in paragone a quelli misurati. Seppur la sua intensità sia inferiore rispetto a quella rilevata negli altri periodi di studio, l'inserimento in simulazione dei valori del vento misurato comportano delle modifiche più evidenti nelle velocità calcolate.

La capacità rappresentativa della presente simulazione è comunque generalmente buona.

Figura 6.20: Confronto velocità calcolate-misurate: rio della Tana**Figura 6.21:** Confronto velocità calcolate-misurate: rio di Sant'Isepo**Figura 6.22:** Confronto velocità calcolate-misurate: rio dei Giardini

6.3 Considerazioni

Dall'analisi dei risultati ottenuti si può concludere come l'inserimento del vento tra le forzanti sia di fondamentale importanza, in quanto gli effetti prodotti non sono trascurabili.

Tale considerazione è da ritenersi valida in particolar modo nei periodi in cui l'intensità del vento agente superi la soglia dei 5 - 10 m/s , confermando quanto sottolineato al Capitolo 4, e provocando degli effetti apprezzabili sia sui livelli che sulle velocità.

Per quanto riguarda gli effetti sulle velocità, non si registra in questo caso un'apprezzabile variazione o miglioramento nei valori di intensità per quei canali in cui la direzione del l'asse e della traversia principale del vento agente siano coincidenti.

I dati di riferimento per lo svolgimento delle simulazioni sono quelli relativi alla stazione di Chioggia diga Sud, in quanto il preponderante miglioramento ottenuto dal punto di vista grafico, rispetto a quello ottenuto con i dati della stazione di Le Saline, viene accompagnato da un netto miglioramento anche dal punto di vista numerico.

Capitolo 7

Effetti del Mo.S.E. in prossimità delle bocche di porto

In merito alle modifiche apportate alle bocche di porto, si analizzano due aspetti di fondamentale importanza per l'alterazione dell'idrodinamica interna all'intera laguna, i cui effetti si rifletteranno poi sul comportamento interno alla rete dei rii della città di Venezia, tema principale della presente tesi.

Scopo di questa analisi è dunque quella di permettere una maggiore conoscenza del comportamento della rete cittadina dei rii al netto delle alterazioni che la circondano, ricordando come in termini di modellazione numerica, come anche nella realtà, il funzionamento della prima è strettamente collegato al comportamento della seconda.

Gli aspetti in analisi sono, per l'appunto, la variazione delle portate scambiate tra mare e laguna attraverso le bocche di porto a seguito dell'ultimazione delle opere fisse del progetto Mo.S.E., e l'alterazione del regime delle correnti all'interno dell'intero dominio di studio, con particolare attenzione per le bocche di porto e per le zone ad esse limitrofe.

Le valutazioni si basano sui risultati numerici ottenuti dall'impiego dei modelli descritti al Capitolo 3, e sul loro confronto con quelli ottenuti da precedenti autori (D'Alpaos, 2010; Ziggiotto, 2013; Matticchio et al., 2017).

7.1 Variazione delle portate

La realizzazione delle nuove opere alle bocche di porto ha portato a delle considerevoli modifiche dal punto di vista idrodinamico all'interno dell'intero bacino lagunare.

A tal proposito uno studio della variazione delle portate scambiate tra mare aperto e laguna nelle varie fasi di marea è fondamentale per intuire la magnitudo dei restanti effetti, e nel contempo per ottenere un'ulteriore verifica della buona riuscita dei processi di taratura condotti sul modello, basandosi sul confronto con i risultati di letteratura (D'Alpaos, 2010).

In Tab. 7.1 sono riportati i massimi valori di flusso e riflusso passanti nelle singole bocche di porto e in totale, considerando una marea di sizigia riferita al periodo di simulazione "San Polo - Santa Croce" descritto in sottosezione 4.1.3

Tabella 7.1: Variazione delle portate in transito alle bocche di porto (m^3/s)

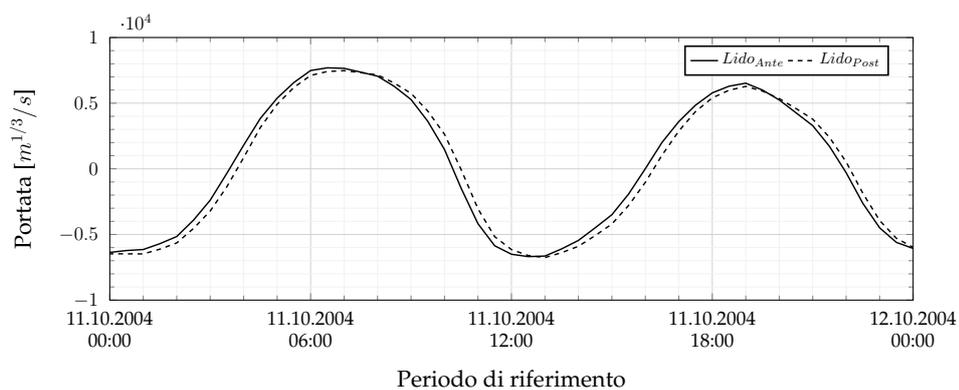
Fase	Flusso Ante	Flusso Post	Riflusso Ante	Riflusso Post
Lido	8437	8238	9032	9002
Malamocco	10573	8849	11418	8969
Chioggia	5386	4901	5918	5552
Totale	24397	21989	26368	23525

La bocca maggiormente penalizzata è quella di Malamocco, che registra riduzioni rispettivamente del 16.3% in fase di flusso e del 21.4% in fase di riflusso. A seguire la bocca di Chioggia subisce attenuazioni per il 9% in flusso e il 6.2% in riflusso, mentre la bocca di Lido, vede attenuazioni per il 2.3% in flusso e lo 0.3% in riflusso. La *variazioni totale* si attesta al 9.8% per la fase di flusso e a 10.8% per la fase di riflusso.

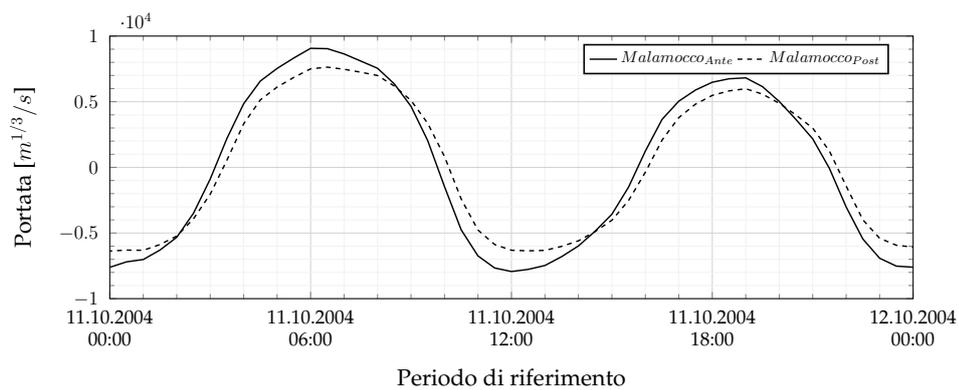
Questi risultati sono in disaccordo con quelli ottenuti da D'Alpaos nei suoi studi, nei quali le variazioni risultavano più limitate, raggiungendo il 4% di attenuazione della portata totale scambiata in entrambe le fasi.

La differenza potrebbe essere dovuta alla mancata modificazione del valore di K_S alle bocche di porto, oltre che alla mancanza di alcune opere fisse nel modello, in quanto realizzate successivamente al periodo di svolgimento degli studi citati.

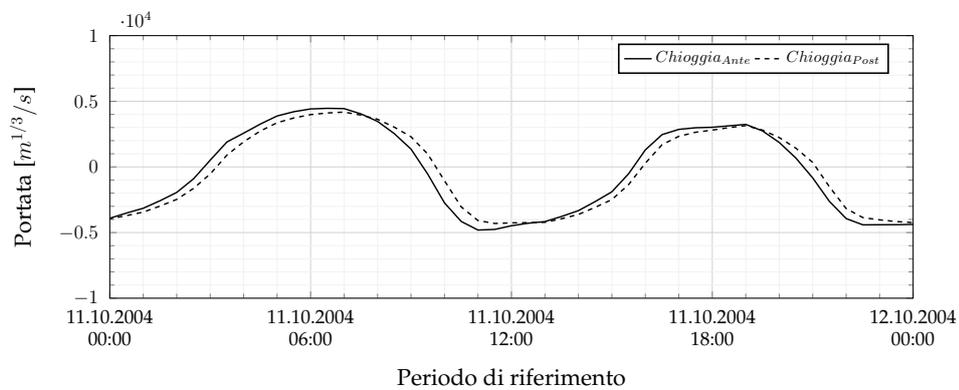
Figura 7.1: Andamento delle portate scambiate attraverso la bocca di Lido (a), Malamocco (b) e Chioggia (c) con il mare per le configurazioni della laguna in assenza e con inserite le opere fisse previste dal Mo.S.E..



(a)



(b)



(c)

7.2 Variazione delle velocità

La creazione delle nuove opere alle bocche presenta interessanti effetti anche nei confronti del regime delle velocità, sia nella parte interna alla laguna che all'interno delle bocche di porto modificate e nelle zone limitrofe.

Strettamente collegati a queste variazioni sono necessariamente l'evoluzione dei fondali e dei litorali in prossimità di tali opere.

7.2.1 Effetti sul bacino della laguna

L'inserimento delle nuove opere alle bocche comporta una generale riduzione delle velocità di deflusso all'interno della laguna, come dimostrano la fig. 7.2 per la fase di flusso e la fig. 7.3 per la fase di riflusso.

A queste riduzioni generalizzate delle velocità si accompagnano sempre dei loro incrementi all'interno delle bocche, dovuti al loro restringimento, necessario per la costruzione delle opere fisse del Mo.S.E..

Unico comportamento anomalo all'interno della laguna sembra essere tenuto solo Canale di Treporti, nel quale le velocità subiscono un apprezzabile aumento dopo la costruzione delle opere.

Questo porta di conseguenza ad un lieve ma visibile incremento delle velocità nella parte settentrionale della laguna.

Tutte queste considerazioni confermano i risultati ottenuti da precedenti studi (D'Alpaos, 2010).

Le presenti valutazioni devono tener conto inoltre del ritardo di propagazione della marea nel bacino lagunare, i cui effetti si ripropongono con le stesse modalità ed intensità anche nelle velocità.

Considerando i grafici delle portate riportati in fig. 7.1, e basandosi su analisi di Letteratura (Matticchio et al., 2017) si ricorda come l'incremento delle resistenze alle bocche, oltre a comportare una riduzione delle portate sia anche responsabile di un certo ritardo nella loro propagazione, prossimo ai 15 - 20 minuti.

Le entità del ritardo e delle variazioni di intensità riscontrabili nelle singole posizioni della laguna sono necessariamente legate al bacino di appartenenza della specifica zona, in quanto ogni bocca produce effetti diversi, e alla loro diversa combinazione in funzione della zona di interesse.

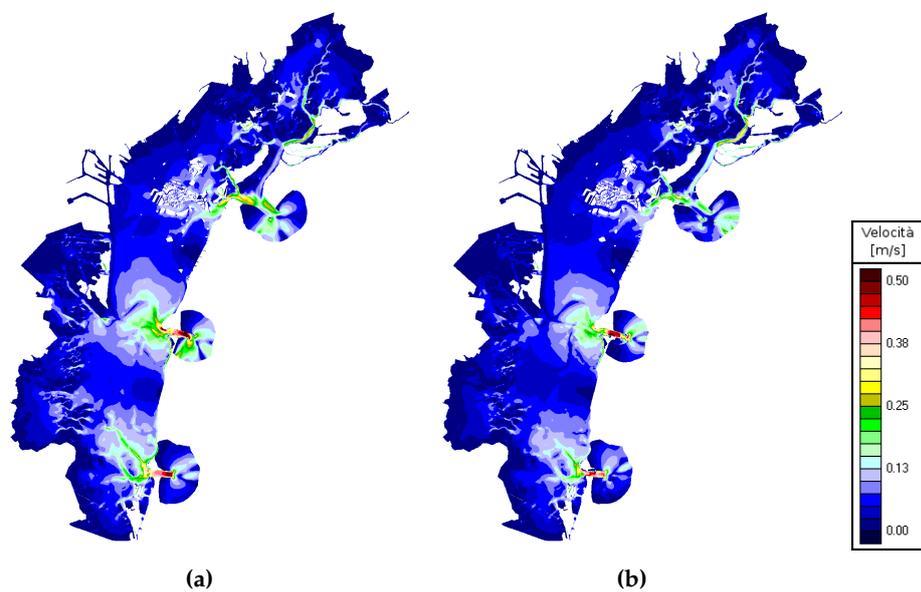


Figura 7.2: Distribuzione spaziale dei valori delle velocità nella laguna in fase di massimo flusso nelle sue configurazioni in presenza (a) e assenza (b) delle opere fisse previste dal Mo.S.E.

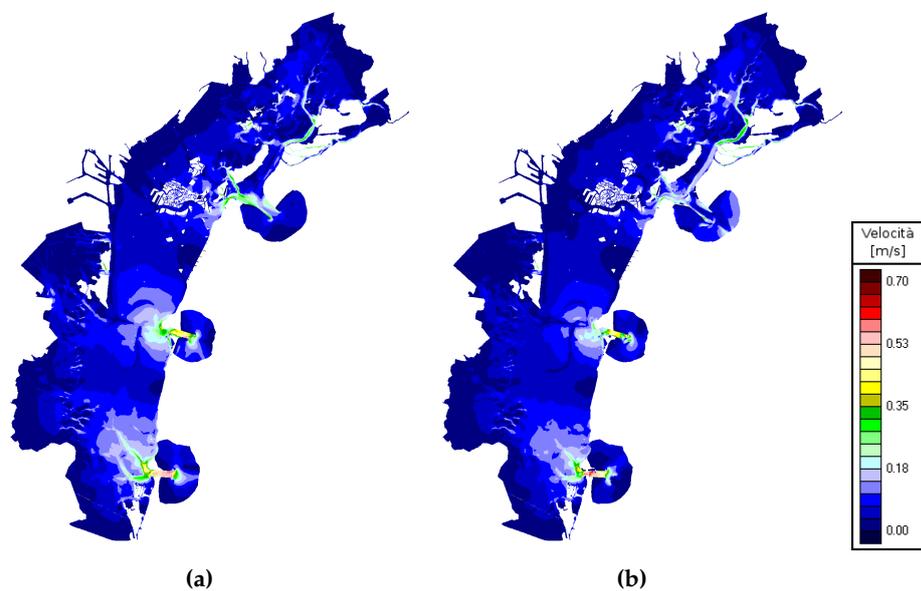


Figura 7.3: Distribuzione spaziale dei valori delle velocità nella laguna in fase di massimo riflusso nelle sue configurazioni in presenza (a) e assenza (b) delle opere fisse previste dal Mo.S.E.

7.2.2 Bocca di Lido

Le modifiche apportate alla bocca di Lido comportano l'alterazione dei flussi presenti nei limitrofi canali di Treporti, in cui la velocità aumenta sensibilmente, e di S. Nicolò e S. Erasmo, dove queste diminuiscono in entrambe le fasi.

La presenza della lunata esterna alla bocca condiziona in modo evidente l'andamento dei flussi entranti e uscenti nelle due fasi, rendirizzandoli ortogonalmente all'asse della bocca e producendo apprezzabili vorticosità nella parte rivolta verso la laguna.

La parte interna della bocca è interessata da una generale riduzione delle velocità e dalla variazione della loro distribuzione.

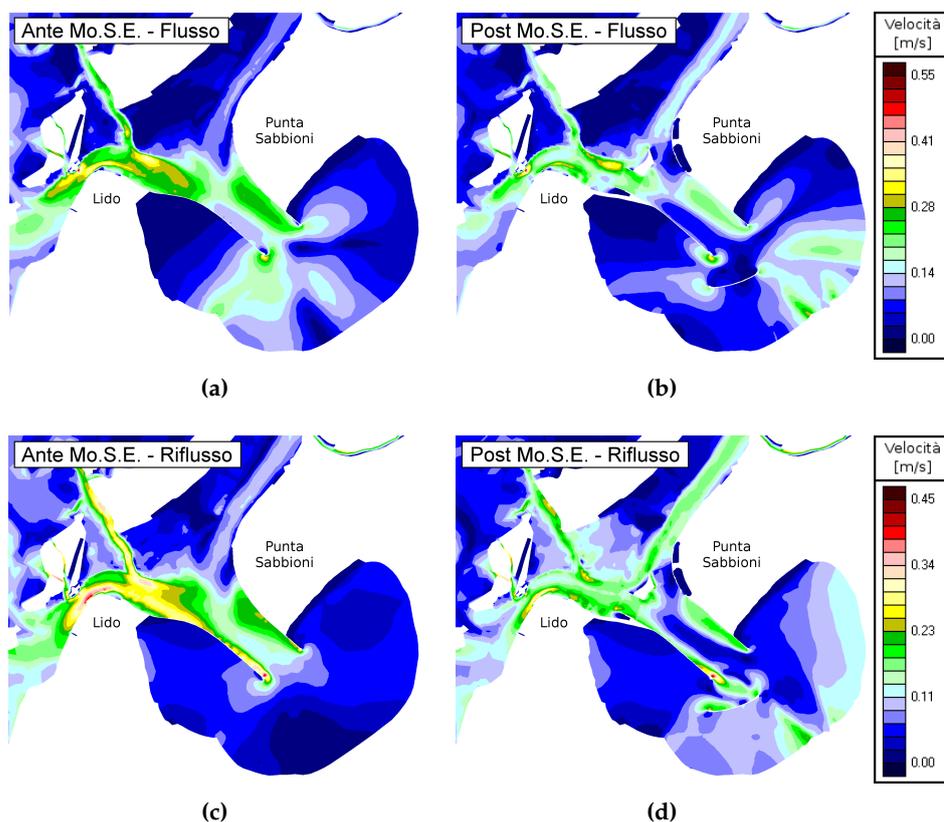


Figura 7.4: Distribuzione istantanea delle velocità alla bocca di Lido nella fase di massimo flusso (sopra) e massimo riflusso (sotto) della marea di riferimento considerata, nelle configurazioni in presenza (destra) e assenza (sinistra) delle opere fisse previste dal Mo.S.E..

7.2.3 Bocca di Malamocco

Le modifiche alla bocca di Malamocco comportano l'alterazione delle velocità sia all'interno della bocca stessa che nelle aree limitrofe.

Le velocità massime tendono a spostarsi nella parte centrale della bocca di porto, in prossimità del suo restringimento, provocando di conseguenza la formazione di una serie di macrovortici in continuo movimento all'interno della stessa.

La presenza della conca di navigazione e del molo di protezione comporta un'alterazione della direzione dei flussi in ingresso e uscita alla bocca, aumentando il grado di protezione del lido di Pellestrina, a discapito di quello di Alberoni, maggiormente interessato dalle variazioni di velocità.

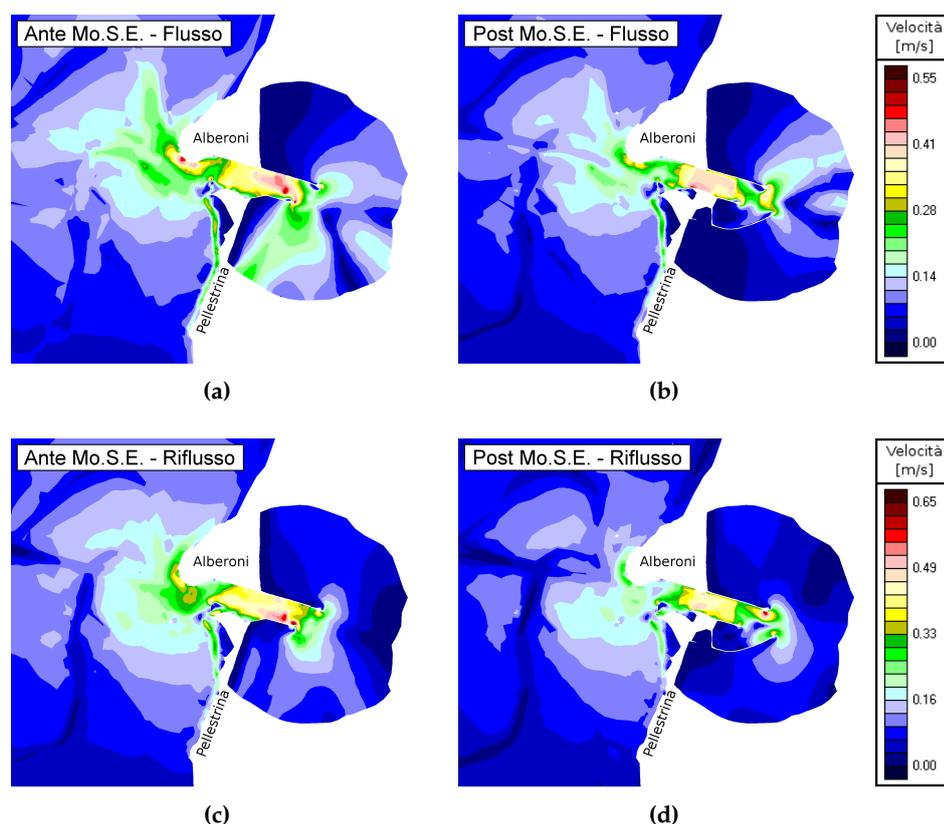


Figura 7.5: Distribuzione istantanea delle velocità alla bocca di Malamocco nella fase di massimo flusso (sopra) e massimo riflusso (sotto) della marea di riferimento considerata, nelle configurazioni in presenza (destra) e assenza (sinistra) delle opere fisse previste dal Mo.S.E..

7.2.4 Bocca di Chioggia

L'effetto delle nuove opere comporta per la bocca di Chioggia, la formazione di effetti paragonabili a quelli delle altre bocche.

La riduzione della larghezza comporta un'alterazione ben più evidente della distribuzione e dell'ammontare delle velocità di deflusso, per lo più aumentate nella parte interna, e diminuite nelle aree limitrofe, alterando di conseguenza gli equilibri erosivi presenti.

La nuova configurazione delle opere esterne contribuisce alla formazione di flussi che interessano i litorali in prossimità della bocca, soprattutto quello meridionale di Sottomarina.

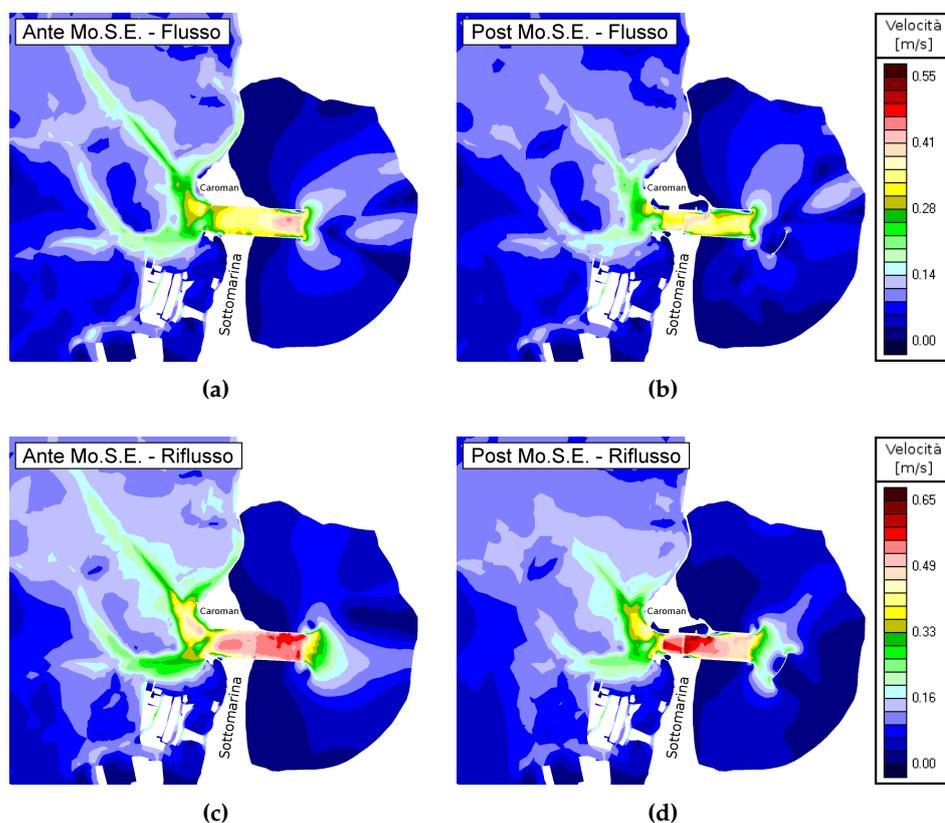


Figura 7.6: Distribuzione istantanea delle velocità alla bocca di Chioggia nella fase di massimo flusso (sopra) e massimo riflusso (sotto) della marea di riferimento considerata, nelle configurazioni in presenza (destra) e assenza (sinistra) delle opere fisse previste dal Mo.S.E..

7.3 Considerazioni

La modificata configurazione geometrica delle bocche di porto porta dunque una alterazione del comportamento delle velocità sia nella parte interna alla bocca che nelle sue aree limitrofe, in accordo con quanto previsto da precedenti Autori (D'Alpaos, 2010).

L'accordo con questi risultati non è mai completo, in quanto le schematizzazioni non sono del tutto coincidenti né dal punto di vista geometrico né per l'attribuzione dei parametri descrittivi utilizzati per il modello. Il maggiore valore delle resistenze imposte e l'aggiunta delle opere foranee alla bocca di Lido comportano l'incremento della capacità dissipativa e delle resistenze imposte, portando all'incremento delle variazioni osservate nei precedenti studi sopra citati.

Le maggiori resistenze si incontrano alla bocca di Malamocco, seguita dalle bocche di Chioggia e Lido, confermando ulteriori studi presenti in Letteratura (Ziggiotto, 2013; Matticchio et al., 2017), e i risultati riportati al Capitolo 8.

Capitolo 8

Effetti del Mo.S.E. sulla laguna e sulla città di Venezia

8.1 Introduzione

L'analisi degli effetti introdotti nell'idrodinamica lagunare e dei rii interni alla città di Venezia dalla modifiche alle bocche di porto, legate all'ultimazione del progetto Mo.S.E., viene condotta considerando tre aspetti fondamentali, tra loro strettamente collegati:

- La propagazione dei livelli;
- Il deflusso nei rii cittadini;
- La posizione delle fasce di partiacque.

L'analisi delle variazioni di tali aspetti tra le configurazioni della laguna antecedente e successiva l'ultimazione dei lavori del Mo.S.E. viene condotta basandosi sull'accoppiamento di valutazioni numeriche e grafiche, allo scopo di massimizzare l'efficienza nella valutazione, facendo riferimento a precedenti esperienze di letteratura (Coraci et al., 2007; Ziggiotto, 2013; Matticchio et al., 2017) e alle "cronache" degli abitanti locali, diretti utilizzatori del territorio e delle sue vie d'acqua.

I risultati e i relativi commenti sono riportati alla fine delle relative Sezioni.

8.2 Analisi dei livelli

L'analisi dei livelli si basa sul confronto tra i risultati ottenuti dalle simulazioni svolte sulle griglie computazionali riferite ai periodi Ante e Post lavori del Mo.S.E..

Il periodo di simulazione utilizzato per entrambe le configurazioni deve necessariamente essere lo stesso, in modo da permettere il confronto tra i segnali d'onda calcolati.

Nel nostro caso è stato considerato il periodo che va dalle 00:00 del 07/10/2004 alle 00:00 del 22/10/2004, indicato al Capitolo 4 come "*San Polo - Santa Croce*".

Le stazioni di riferimento utilizzate per lo studio del comportamento dei livelli nelle due configurazioni, sono state scelte:

- In modo da essere significative per la descrizione degli effetti indotti dalle bocche di porto in funzione delle modifiche ad esse apportate;
- In modo da avere almeno una stazione di riferimento per ognuno dei tre sottobacini lagunari alimentati dalle bocche di porto;
- In modo da coincidere con quelle usate per la taratura, per avere un ulteriore riscontro sull'adeguatezza dei dati calcolati, in aggiunta alla già riportata verifica del modello sui livelli.

Per la valutazione numerica sono dunque state considerate le stazioni di *San Nicolò*, *Faro Rocchetta* e *Chioggia Vigo*.

La valutazione degli effetti sui livelli è stata compiuta sulla base dei seguenti passaggi:

- L'analisi grafica delle variazioni dei livelli sui segnali d'onda;
- L'analisi delle variazioni percentuali di ampiezza media utilizzando la formula per la valutazione di tale parametro, qui nuovamente riportata per chiarezza espositiva:

$$A_{med} = \frac{1}{N_{max}} \sum_{i=1}^{N_{max}} H_i^{max} - \frac{1}{N_{min}} \sum_{j=1}^{N_{min}} H_j^{min} \quad (3.2)$$

- L'analisi dei ritardi sulla propagazione dei livelli condotta sempre su base grafica.
-

8.2.1 Effetti sulla propagazione dei livelli

Sulla base delle fig. da 8.1 a 8.3, e dei valori riportati in Tab. 8.1, possono essere fatte le seguenti osservazioni in merito alla variazione del comportamento dei livelli:

- La riduzione dei livelli a seguito della modifica delle bocche di porto viene confermata;
- Le variazioni delle ampiezze calcolate, in termini effettivi e percentuali, come riportato in Tab.8.1, si avvicinano ai valori riportati in merito alle variazioni della marea reale in Matticchio et al., 2017 per le stesse stazioni mareografiche.
Questo conferma l'ottima capacità di simulazione del fenomeno di propagazione dei livelli in laguna da parte del modello nelle due configurazioni adottate;
- Dall'andamento delle curve di livello riportate nelle fig. 8.4 e 8.5, si nota come le modifiche apportate alle bocche di porto comportino un incremento delle resistenze tale da rallentare la propagazione delle maree all'interno della laguna sia nelle fasi di flusso che di riflusso.

Tabella 8.1: Confronto tra valori di letteratura e simulati delle variazioni delle ampiezze nelle stazioni di riferimento per la caratterizzazione del comportamento nei sottobacini alimentati dalle bocche di porto

Caso	U.M.	Punta Salute	Faro Rocchetta	Chioggia Vigo
$\Delta A_{med,calcolata}$	[cm]	4.27	4.27	3.36
$\Delta A_{med,misurata}$	[cm]	4.10	4.20	2.80
$\Delta \% A_{med,calcolata}$	%	-6.76	-7.01	-5.60
$\Delta \% A_{med,misurata}$	%	-6.67	-7.19	-4.86

Figura 8.1: Confronto livelli Ante - Post Mo.S.E. - Stazione di San Nicolò

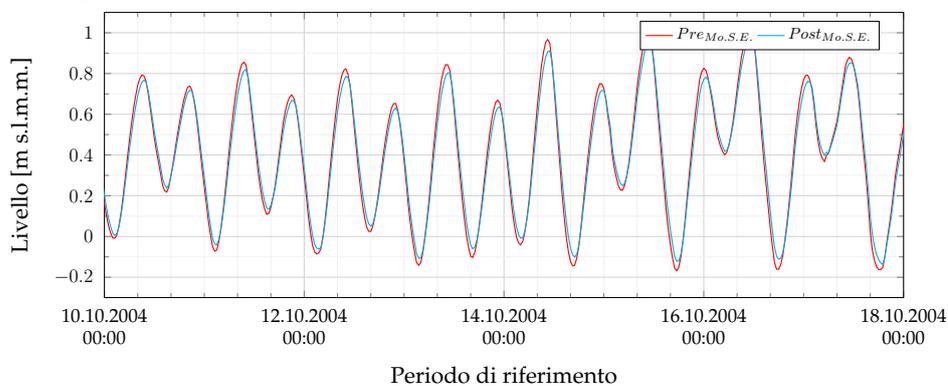


Figura 8.2: Confronto livelli Ante - Post Mo.S.E. - Stazione di Faro Rocchetta

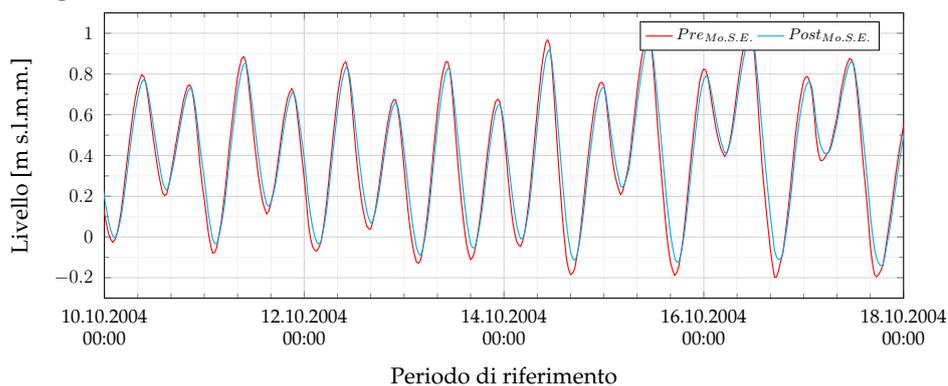
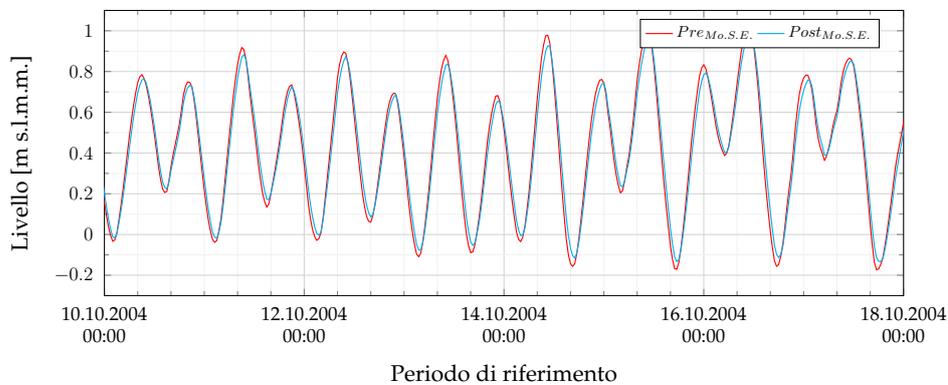


Figura 8.3: Confronto livelli Ante - Post Mo.S.E. - Stazione di Chioggia Vigo



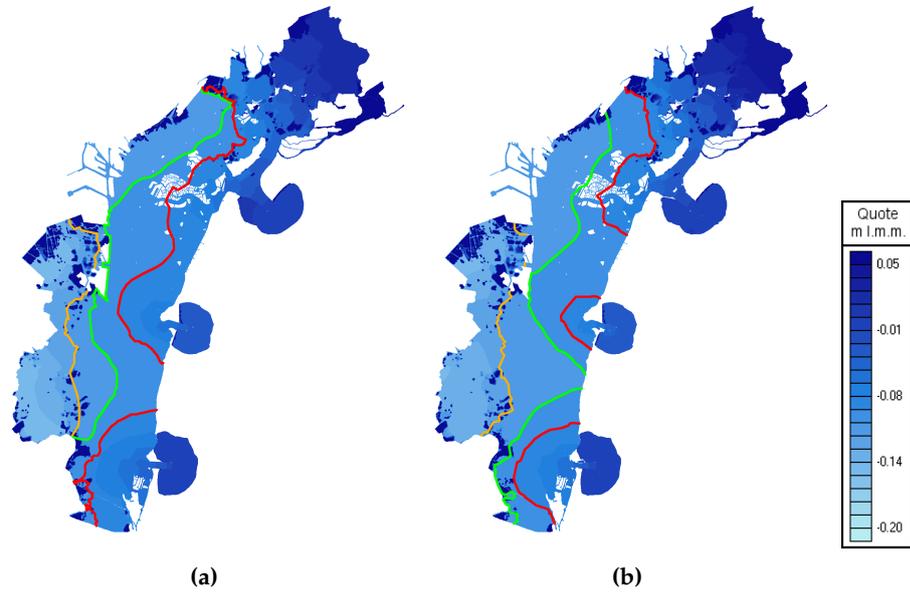


Figura 8.4: Livelli istantanei in fase di flusso. a) = Ante Mo.S.E.; b) = Post Mo.S.E.
Rosso = -0.0875 m ; Verde = -0.100 m ; Arancione = -0.125 m .

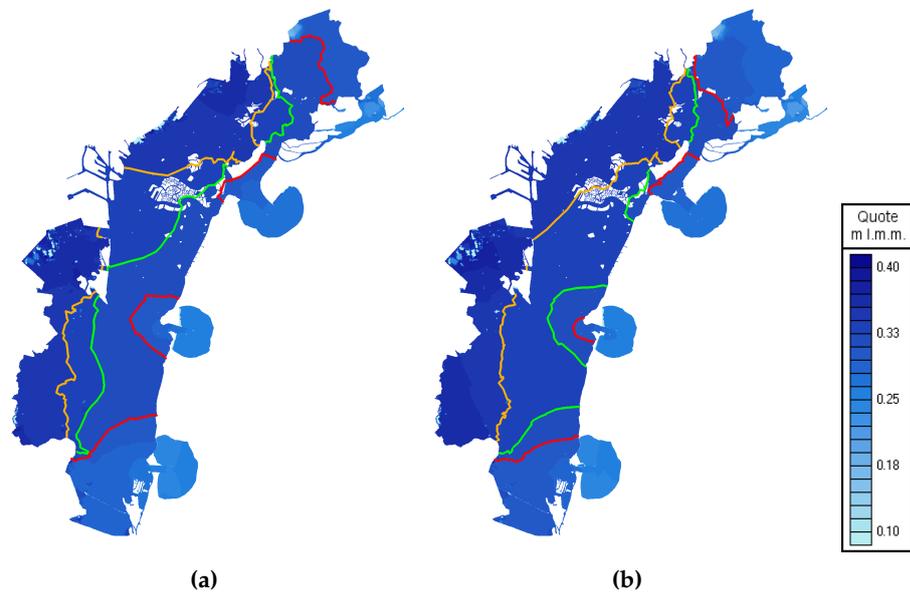


Figura 8.5: Livelli istantanei in fase di riflusso. a) = Ante Mo.S.E.; b) = Post Mo.S.E.
Rosso = 0.300 m ; Verde = 0.320 m ; Arancione = 0.340 m .

8.3 Analisi delle velocità nei rii di Venezia

Tema fondamentale del presente lavoro di tesi è l'analisi degli effetti prodotti sulla circolazione interna alla rete dei canali di Venezia a seguito delle modifiche apportate alle bocche di porto per la costruzione del Mo.S.E..

Sulla base degli studi di precedenti autori (Ziggiotto, 2013; Matticchio et al., 2017) e sull'esperienza diretta degli abitanti della città, a seguito della costruzione delle suddette opere, che dovrebbero difendere la città dagli effetti dell'acqua alta, la circolazione interna ai rii cittadini ha subito delle modifiche, tanto marcate da poter essere apprezzate anche in assenza di strumenti, in alcune zone della città.

Le modifiche sembrano interessare in primo luogo *l'intensità dei deflussi*. Mentre l'osservazione diretta (non strumentale) sottolinea solo l'incremento delle velocità in alcuni punti della rete, l'esperienza idraulica e la conoscenza degli effetti dissipativi indotti dalle bocche, necessariamente portano a osservazioni più dettagliate, secondo cui all'incremento dei deflussi in alcune zone competono delle riduzioni in altre.

Sempre l'osservazione diretta suggerisce come a seguito della realizzazione delle opere fisse alle bocche non solo l'intensità, bensì anche la *direzione dei deflussi interni* ai rii cittadini abbia subito delle modifiche. Tale considerazione, già verificata in passato (Ziggiotto, 2013; Matticchio et al., 2017) sarà analizzata in modo specifico nelle seguenti sezioni.

Necessariamente tali modifiche sono accompagnate da delle *variazioni dei livelli* riscontrati all'interno della rete. Com'è noto infatti, a governo del deflusso idraulico vi sono proprio i piccoli gradienti idraulici tra le varie zone della rete.

L'analisi di questi effetti sarà svolta sulla base di valutazioni di natura numerica, condotte sulle simulazioni svolte nei differenti periodi, prendendo come riferimento le configurazioni Ante e Post modifiche della laguna di Venezia. Lo studio interesserà dapprima i canali su cui sono state svolte delle misure dirette prima delle modifiche, su cui si auspica il futuro svolgimento di nuove misure nello stato attuale, e poi sull'intera rete, differenziandone gli effetti in relazione a zone aventi comportamento omogeneo.

8.3.1 Periodo rilievi San Polo - Santa Croce

I valori delle velocità calcolate dal modello nelle configurazioni della laguna Ante e Post Mo.S.E. sono riportati nelle fig. da 8.6 a 8.8 e distinti nei tre rii su cui sono stati svolti i rilievi nel periodo "San Polo - Santa Croce".

Si osserva che:

- Le velocità calcolate sulla griglia che riproduce la geometria successiva ai lavori alle bocche sono minori rispetto a quelle calcolate con la griglia relativa alla configurazione geometrica precedente. In particolar modo questo effetto è visibile soprattutto in relazione ai colmi, dove la differenza tra i due casi è netta.

Tale aspetto è comune a tutti e tre i canali considerati.

Il divario non supera generalmente i 2 cm/s ;

- Le velocità nella configurazione Post Lavori tendono a posticipare quelle calcolate nel periodo Ante lavori. Seppur l'ammontare di questo ritardo sia alquanto contenuta, essa sottolinea la presenza di un non trascurabile effetto dovuto alle modifiche alle bocche.

L'aspetto è anche in questo caso comune in tutti i canali considerati.

Entrambe le considerazioni sopra riportate si trovano in perfetto accordo con quanto riscontrato nello stesso periodo di studio e con le medesime configurazioni geometriche dallo studio dei livelli calcolati e misurati nelle stazioni metro-mareografiche presenti all'interno del territorio della laguna (generale abbassamento e incremento del ritardo).

Questo sottolinea la particolarità del comportamento dei canali in relazione all'idrodinamica dell'intera laguna, a cui è strettamente legato nel suo funzionamento.

Causa di tale comportamento sembra essere lo spostamento verso il centro della laguna del partiacque Lido-Malamocco, che allontanandosi richiama un maggior quantitativo di acqua nella zona in precedenza occupata, aumentando la velocità nei bacini che vedono incrementare la loro superficie di afferenza, sia nelle fasi di flusso che di riflusso, aumentando di conseguenza gli effetti dissipativi e diminuendo i livelli in essi presenti.

Ad essere interessata da tale effetto è soprattutto la rete dei canali maggiori della laguna.

Figura 8.6: Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio di S. Zan Degolà

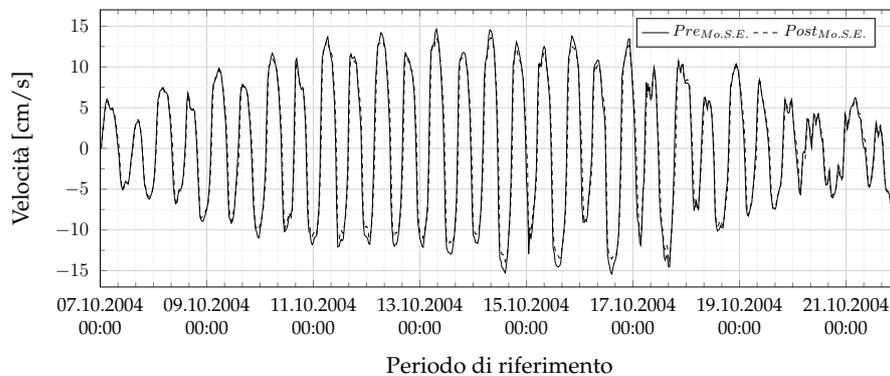


Figura 8.7: Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio di S. Maria Mater Domini

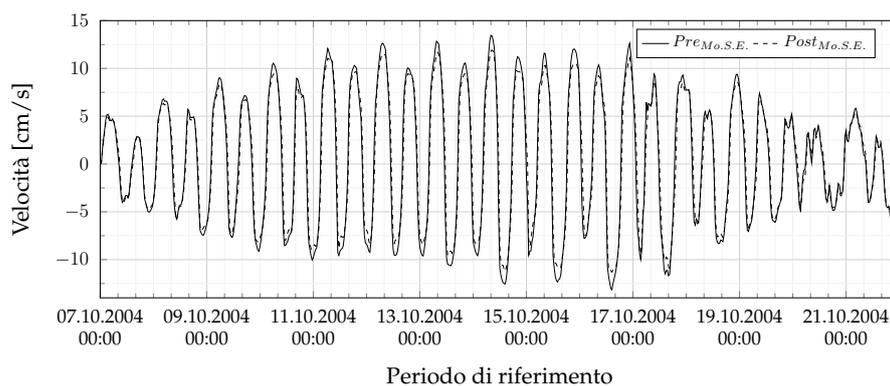
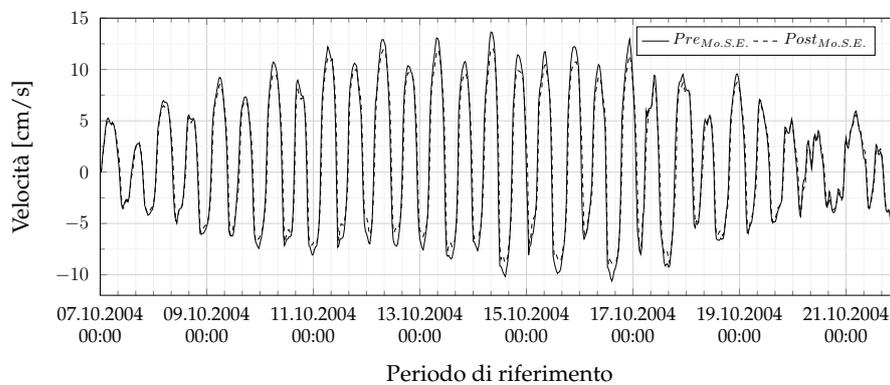


Figura 8.8: Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio de le Becarie



8.3.2 Periodo rilievi Dorsoduro

I valori delle velocità calcolate dal modello nelle configurazioni della laguna Ante e Post Mo.S.E. sono riportati nelle fig. da 8.9 a 8.11 e distinti nei tre rii su cui sono stati svolti i rilievi nel periodo "Dorsoduro".

Si osserva che:

- L'effetto sul valore delle velocità non è comune in tutti e tre i canali. Per il rio dell'Arzere si osserva una generale diminuzione delle velocità a seguito dell'inserimento delle variazioni geometriche della griglia, più evidente nelle fasi di riflusso che di flusso, dove la situazione è per lo più stazionaria. Per il rio del Tentor non sono evidenti forti variazioni delle intensità delle velocità calcolate nei due periodi Ante e Post Mo.S.E.. Per il rio di Santa Margherita il comportamento è il medesimo del rio dell'Arzere, da cui si diversifica per una variazione più evidente in fase di riflusso;
- In merito ai ritardi di fase si osserva come l'inserimento delle opere alle bocche comporti un incremento dei ritardi in tutti i rii considerati.

Anche in questo caso il comportamento è del tutto conforme a quello osservato per i livelli.

Si osserva come la somma delle variazioni di intensità delle correnti e la variazione dei ritardi di fase produca in alcuni casi delle alterazioni traducibili in variazioni delle direzioni delle correnti all'interno dei canali. L'esempio più evidente si verifica nel rio dell'Arzere dopo le ore 08:00 del 01/11/2004, dove per circa quattro ore il verso delle velocità interne al canale è discorde nelle due simulazioni.

Tale comportamento si ripropone in modo meno marcato nel restante periodo di simulazione in relazione a tutti e tre i canali, con effetti praticamente nulli per il rio di S. Margherita.

Figura 8.9: Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio dell'Arzere

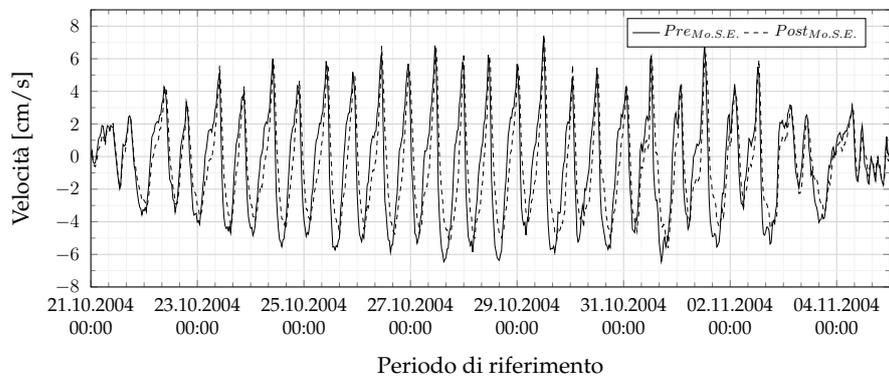


Figura 8.10: Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio del Tentor

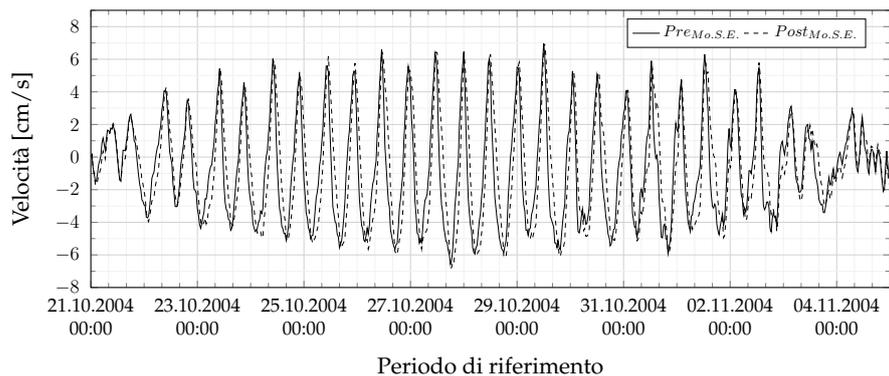
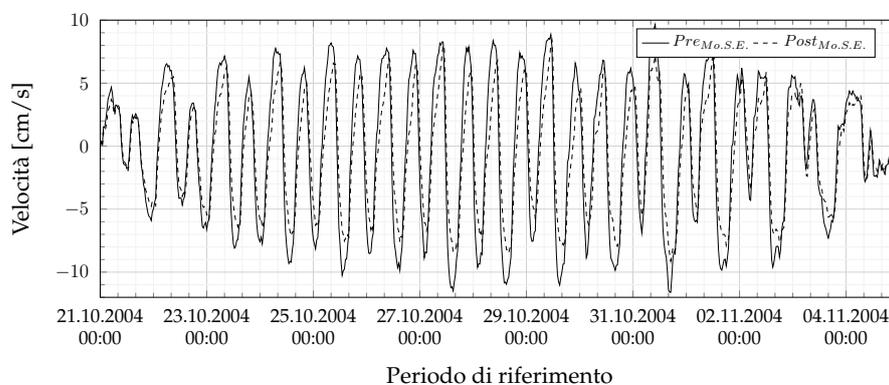


Figura 8.11: Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio di Santa Margherita



8.3.3 Periodo rilievi Cannaregio

I valori delle velocità calcolate dal modello nelle configurazioni della laguna Ante e Post Mo.S.E. sono riportati nelle fig. da 8.12 a 8.14 e distinti nei tre rii su cui sono stati svolti i rilievi nel periodo "Cannaregio".

Si osserva che:

- In tutti e tre i canali di riferimento la velocità diminuisce a seguito dell'installazione delle opere del Mo.S.E.. L'entità di tale decremento è diversa nei tre casi.

Per il rio di San Giobbe la diminuzione non è trascurabile, seppur non superi mai i 3 *cm/s* in tutto il periodo di riferimento. L'ammontare della variazione non è costante nell'intero periodo di simulazione.

Per il rio della Misericordia la variazione è estremamente contenuta e considerabile al più come nulla.

La massima variazione si ottiene per il rio di San Felice, dove questa raggiunge valori poco inferiori ai 10 *cm/s*.

La variazione assume la stessa entità nelle fasi di flusso e riflusso della marea per tutti e tre i canali;

- Anche l'effetto sui ritardi di fase non è il medesimo nei tre canali, risultando minimo per il rio della Misericordia, non eccessivo per il rio di S. Felice e molto marcato per il rio di San Giobbe.

Per tutti e tre i canali il completamento delle opere del Mo.S.E. ha comportato un aumento dei ritardi di fase rispetto alle condizioni precedenti.

Anche in questo caso la combinazione degli effetti sulle velocità e sui ritardi di fase comporta alcune modifiche sui versi di percorrenza dei canali da parte dei flussi idrici. Tale effetto, la cui durata non supera le 2 ore, è particolarmente evidente nel grafico che riporta i dati calcolati per il rio di San Giobbe.

Come per i canali di "San Polo - Santa Croce", anche per questi il comportamento è simile a quello ottenuto per i livelli.

Figura 8.12: Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio di San Giobbe

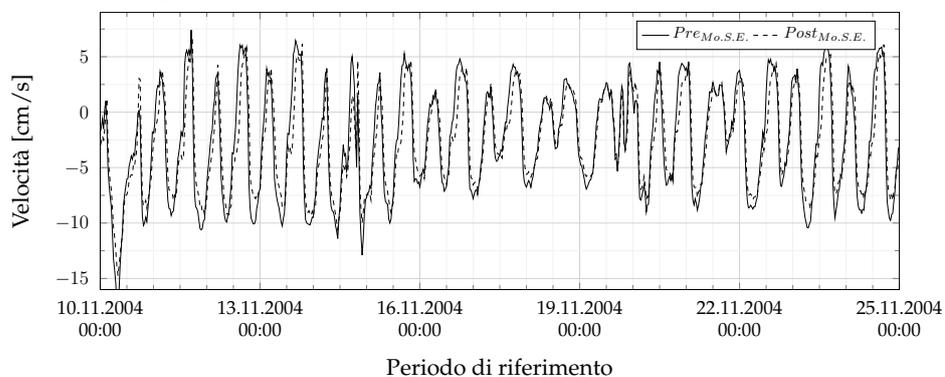


Figura 8.13: Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio della Misericordia

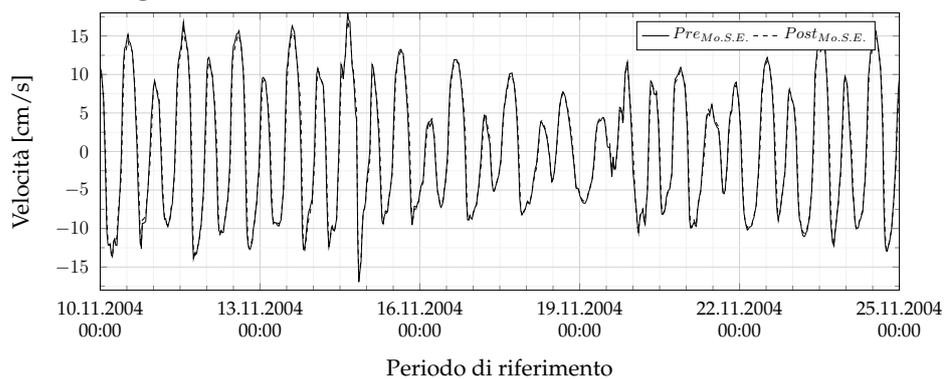
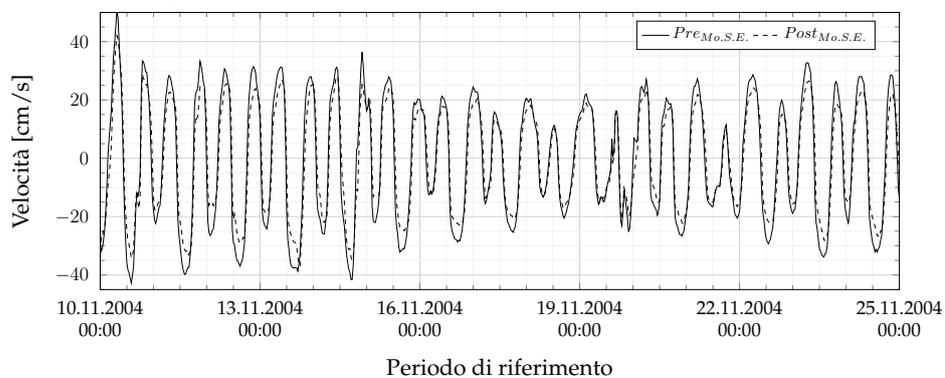


Figura 8.14: Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio di San Felice



8.3.4 Periodo rilievi Castello

I valori delle velocità calcolate dal modello nelle configurazioni della laguna Ante e Post Mo.S.E. sono riportati nelle fig. da 8.15 a 8.17 e distinti nei tre rii su cui sono stati svolti i rilievi nel periodo "Castello".

Si osserva che:

- Gli effetti indotti sui tre canali del sestriere Castello sono tra loro discordi.

In relazione al rio della Tana si osserva una generale diminuzione della velocità di deflusso. In occasione di qualche picco presente nelle fasi di flusso questa risulta aumentata.

Per il rio di S. Isepo l'effetto è opposto, in quanto sia nelle fasi di flusso che di deflusso la velocità nella configurazione geometrica Post Mo.S.E. risulta aumentata.

L'effetto ottenuto è invece nettamente altalenante per il rio dei Giardini, dove si alternano casi di incremento e diminuzione del valore della velocità di deflusso nel canale;

- Allo stesso modo si nota come l'effetto sui ritardi di fase non sia costante. In particolar modo per i rii della Tana e di S. Isepo l'effetto indotto comporta in alcuni casi l'aumento e in altri la diminuzione dei ritardi di fase.

Per il rio dei Giardini è stato ottenuto un generale effetto di incremento del ritardo. Questo comporta l'alterazione della direzione della velocità di deflusso in diverse occasioni, per periodi che raggiungono anche le 4 ore.

Anche in questo caso gli effetti sembrano essere legati ad un maggiore richiamo idrico dovuto allo spostamento della fascia di partiacque, come si vedrà meglio in seguito.

Le variazioni legate ai rii di S. Isepo e dei Giardini sono comuni, in quanto pressoché concomitanti. Il maggiore ritardo ottenuto per il rio dei Giardini sembra essere dovuto al collegamento diretto con il bacino lagunare oltre che alla maggiore dimensione dello stesso, che richiede una sua schematizzazione 2D.

Tale effetto risulta invece parzialmente ridotto per gli altri canali, inseriti più internamente alla rete.

Figura 8.15: Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio de la Tana

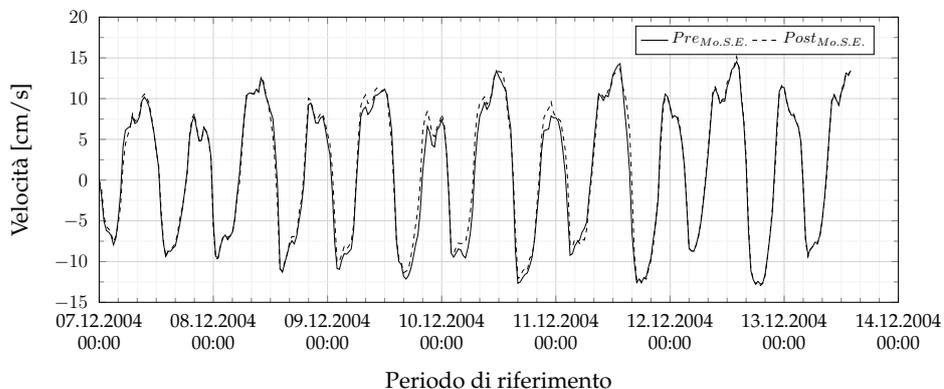


Figura 8.16: Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio di Sant'Isepo

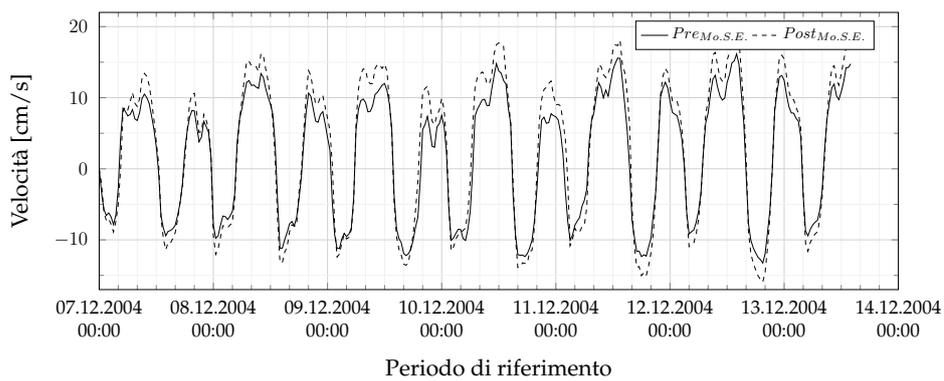
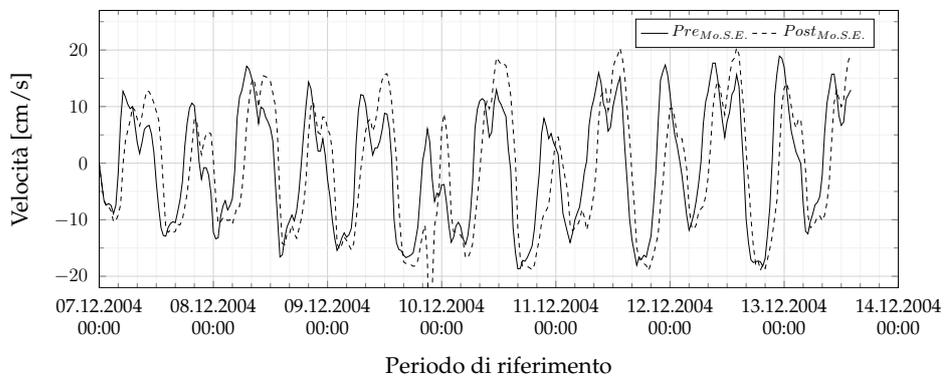


Figura 8.17: Velocità Ante-Post Mo.S.E. - rio dei Giardini



8.4 Analisi dell'intera rete

L'analisi delle velocità nei 12 canali di riferimento per lo svolgimento dei rilievi fornisce un quadro interessante, ma non completo sull'effettivo comportamento della rete in relazione alle variazioni della configurazione geometrica delle bocche e dunque dell'idrodinamica dei rii cittadini.

In particolare è stata riscontrata una non perfetta concordanza degli effetti rilevati all'interno dei canali appartenenti a zone diverse, in quanto la loro differente posizione all'interno della rete comporta necessariamente un diverso comportamento in risposta alle variazioni esterne, da cui possono essere più o meno schermati o interessati.

Per tale motivo si è dunque deciso di ampliare lo studio delle velocità all'intera rete cittadina, verificando il diverso comportamento nelle due configurazioni in analisi.

Per una corretta valutazione i canali sono stati catalogati in due modi:

- Una *prima classificazione* si basa sulla loro diversificazione in relazione al sestriere di appartenenza. Ad ogni canale è stato assegnato un nominativo, formato da un numero e una lettera, che simboleggiano la posizione nello specifico set di canali studiati;
- Una *seconda classificazione* si basa invece sull'analisi degli effetti indotti nei canali dalle modifiche apportate alle bocche di porto.

Per i singoli canali della città, considerando le simulazioni relative ai periodi Ante e Post Mo.S.E., sono state calcolate le variazioni dei singoli picchi di velocità (Δv_i) e il massimo ritardo di fase registrato (Δt_{max}) nel periodo, indicato in sottosezione 4.1.4 come "Dorsoduro".

La valutazione sulla variazione delle velocità è stata svolta confrontando le frequenze con cui sono stati registrati incrementi (Δv_{i+}) o diminuzioni (Δv_{i-}) delle velocità nelle fasi di picco dei segnali. Se la frequenza con cui si riscontrano gli incrementi è maggiore rispetto a quella delle diminuzioni, il rio è soggetto a preponderanti incrementi delle velocità, e viceversa.

La valutazione in relazione al ritardo di fase è stata fatta considerando le seguenti categorie: *debole ritardo* se $\Delta t_{max} < 0.50$ ore; *medio ritardo* se $0.50 < \Delta t_{max} < 1.50$ ore; *forte ritardo* se $\Delta t_{max} > 1.50$ ore.

Alcuni esempi grafici sono riportati in fig. 8.18.

Per una maggiore chiarezza espositiva, nelle seguenti sezioni la classificazione è stata così riportata dal punto di vista grafico:

1. *Rosso*: riduzione delle velocità - debole ritardo;
2. *Blu*: aumento delle velocità - debole ritardo;
3. *Magenta*: riduzione delle velocità - medio ritardo;
4. *Viola*: aumento delle velocità - medio ritardo;
5. *Verde*: riduzione delle velocità - forte ritardo;
6. *Ciano*: aumento delle velocità - forte ritardo.

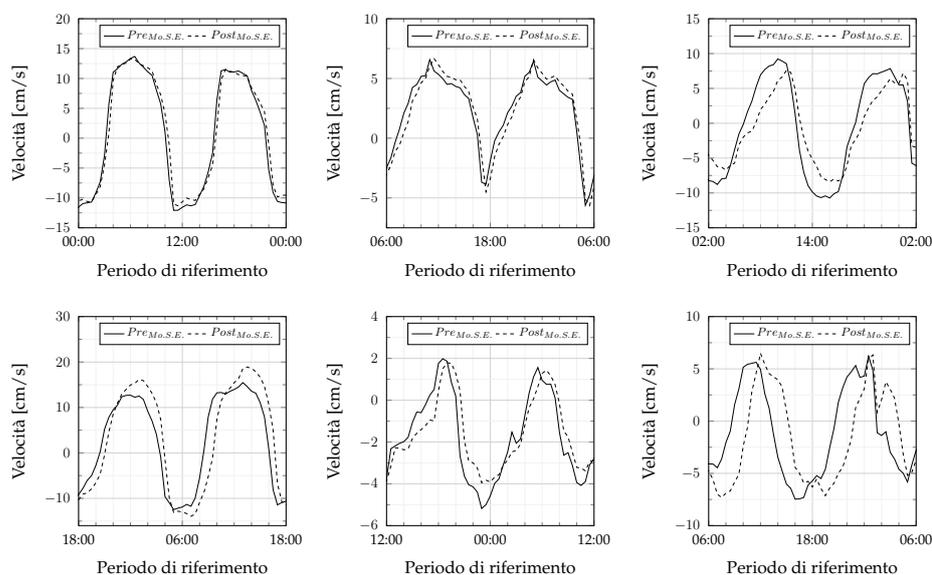


Figura 8.18: Tipi di variazioni incontrate nell'andamento delle velocità

In tutti i canali della rete è stato riscontrato un comune comportamento in relazione ai ritardi di fase, che sono generalmente aumentati nella configurazione Post Mo.S.E. rispetto a quella Ante Mo.S.E., a sottolineare il prominente effetto dissipativo indotto dalle bocche.

Gli effetti maggiori comportano in alcuni casi un ritardo tale da invertire la direzione della corrente nelle medesime fasi di marea considerate nelle due diverse configurazioni.

Proprio su questi casi si concentrerà maggiormente la nostra analisi.

8.4.1 Sestriere Cannaregio

Per lo studio del sestriere di Cannaregio, come riportato in fig. 8.19, sono stati considerati:

- 110 *elementi monodimensionali*, suddivisi in 11 gruppi, per i quali si è ricavato l'andamento nel tempo delle portate fluenti nella loro sezione mediana;
- 12 *nodi*, suddivisi in 2 gruppi, per i quali si è ricavato l'andamento nel tempo dei tiranti.

La relazione tra livelli, dimensioni dei canali e portate permette di calcolare gli andamenti delle velocità nel tempo.

Il periodo di studio considerato è quello "San Polo - Santa Croce", descritto in sottosezione 4.1.3.

Il confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni relative alle diverse configurazioni geometriche sono riportati graficamente in fig. 8.20.

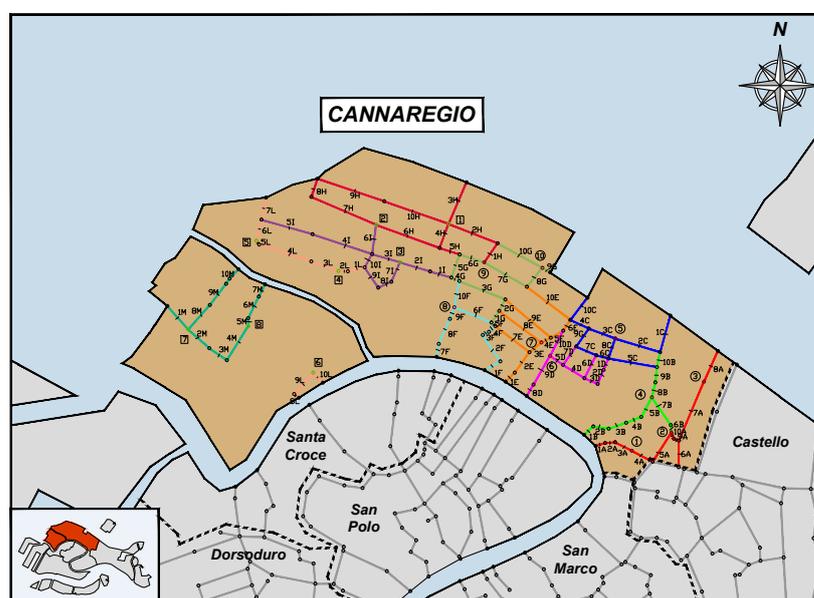


Figura 8.19: Suddivisione dei canali 1D e dei nodi nel sestriere Cannaregio

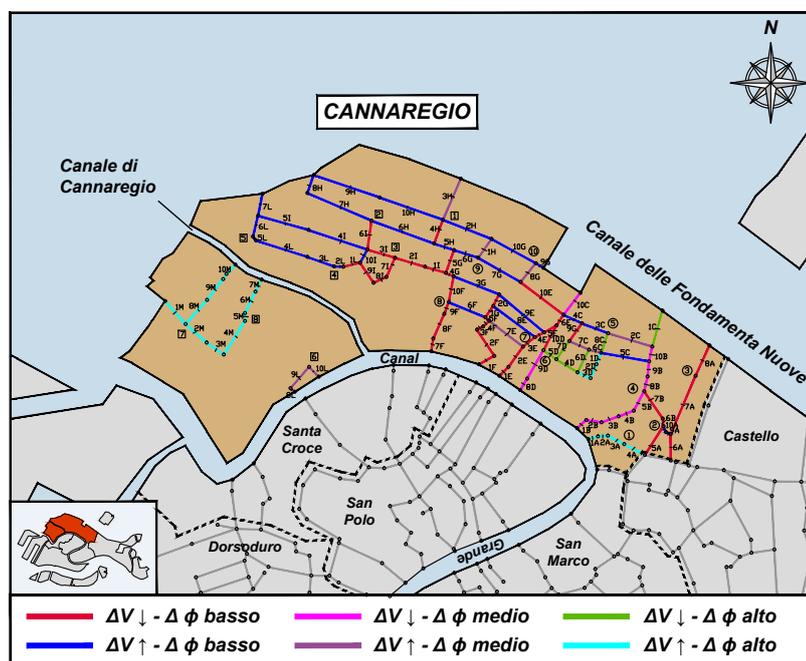


Figura 8.20: Classificazione canali 1D in funzione di ampiezza e ritardo

Si nota che:

- Gli effetti ottenuti per i vari canali sono tra loro molto diversi, sia in termini di ritardo di fase che di variazione effettiva delle velocità;
- La posizione dei canali sembra essere influente sul loro effettivo comportamento. Questo sembra essere dovuto essenzialmente alla prossimità dei singoli canali con i canali maggiori, e alle diverse condizioni al contorno di livello da questi fornite. In particolar modo si nota come il comportamento in termini di valori e tempi del deflusso sia diverso per i rii alimentati dal Canal Grande, dal Canale delle Fondamenta Nuove e dal Canale di Cannaregio;
- Le caratteristiche geometriche dei canali sembrano non influire sul loro effettivo comportamento e sulle loro variazioni. Canali con caratteristiche simili presentano comportamenti molto diversi.

8.4.2 Sestriere Castello

Per lo studio del sestriere di Castello, come riportato in fig. 8.21, sono stati considerati:

- 95 *elementi monodimensionali*, suddivisi in 10 gruppi, per i quali si è ricavato l'andamento nel tempo delle portate passanti nella loro sezione mediana;
- 25 *nodi*, suddivisi in 3 gruppi, per i quali si è ricavato l'andamento nel tempo dei tiranti.

Dalla relazione tra livelli, dimensioni dei canali e portate possono calcolarsi gli andamenti delle velocità nel tempo.

Il periodo di studio considerato è sempre quello "San Polo - Santa Croce", descritto in sottosezione 4.1.3.

Il confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni relative alle diverse configurazioni geometriche sono riportati graficamente in fig. 8.22.

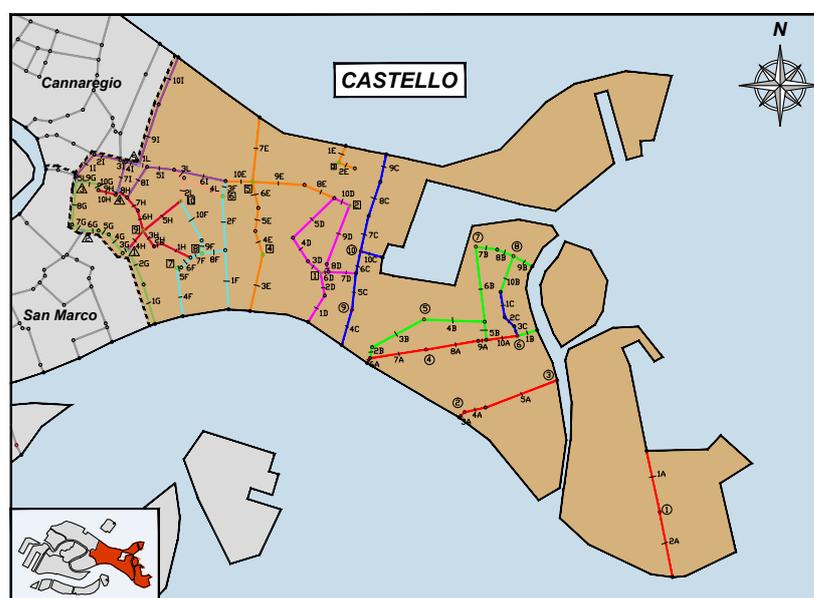


Figura 8.21: Suddivisione dei canali 1D e dei nodi nel sestriere Castello

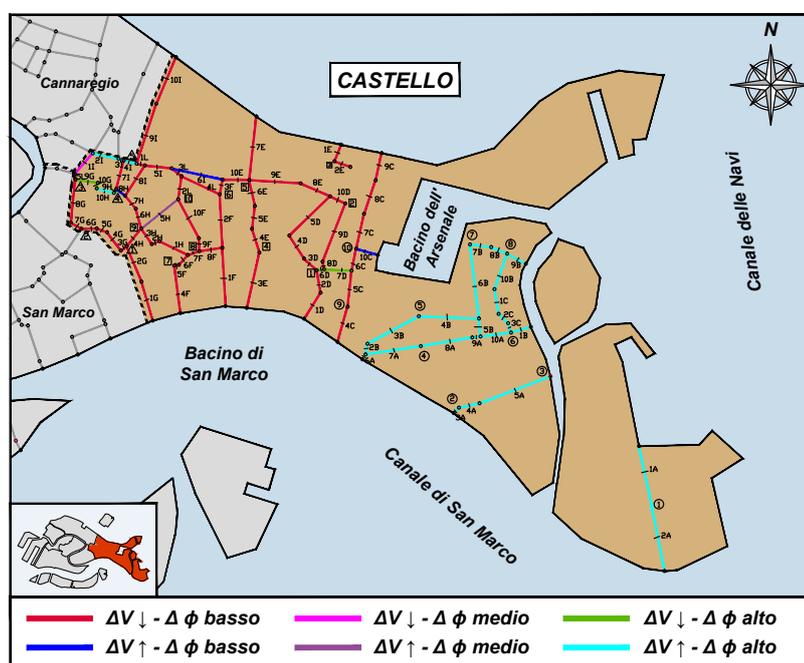


Figura 8.22: Classificazione canali 1D in funzione di ampiezza e ritardo

Si nota che:

- Il comportamento dei rii non è uniforme nel sestriere, sia in termini di effetti sulle ampiezze medie, in alcuni casi aumentate e in altri diminuite, sia in termini di variazioni di fase, il cui effetto è in alcuni casi vistoso e in altri molto contenuto;
- La diversa reazione dei rii in relazione alle modifiche alle bocche di porto sembra essere legata alla loro posizione, e in particolar modo a quella degli sbocchi a diretto contatto con la laguna. Questo in quanto il ritardo prodotto nella propagazione dei livelli in laguna si riflette in una diversa modalità di approvvigionamento per i canali e dunque in diverse condizioni al contorno da applicare agli stessi. In questo caso i canali con alimentazione Nord-Sud si comportano diversamente da quelli con alimentazione Est-Sud;
- Le variazioni sembrano essere solo minimamente legate alle caratteristiche geometriche dei rii.

8.4.3 Sestriere Santa Croce

Per lo studio del sestriere di Santa Croce, come riportato in fig. 8.23, sono stati considerati:

- 21 *elementi monodimensionali*, suddivisi in 3 gruppi, per i quali si è ricavato l'andamento nel tempo delle portate passanti nella loro sezione mediana;
- 5 *nodi*, contenuti in un singolo gruppo per i quali si è ricavato l'andamento nel tempo dei tiranti.

La relazione tra livelli, dimensioni dei canali e portate permette di calcolare gli andamenti delle velocità nel tempo.

Il periodo di studio considerato è sempre quello "San Polo - Santa Croce", descritto in sottosezione 4.1.3.

Il confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni relative alle diverse configurazioni geometriche sono riportati graficamente in fig. 8.24.

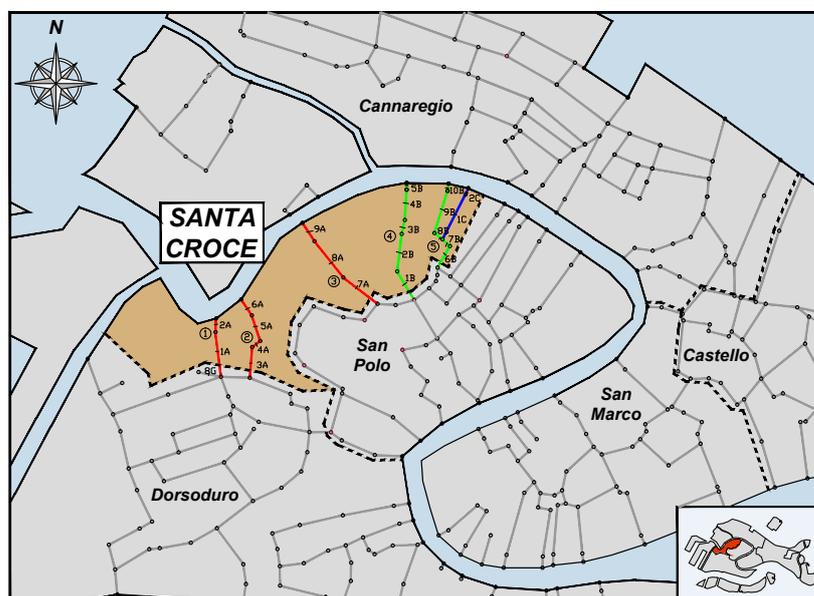


Figura 8.23: Suddivisione dei canali 1D e dei nodi nel sestriere Santa Croce

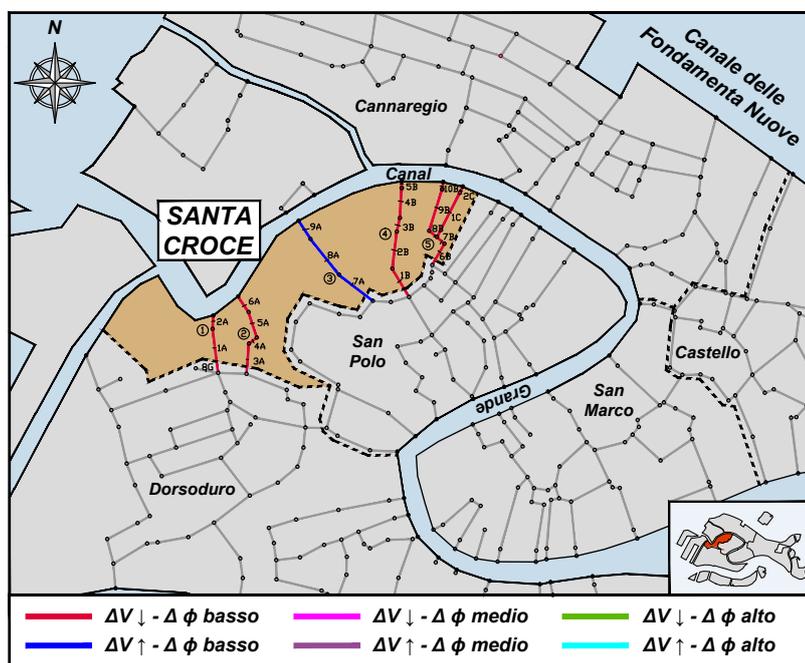


Figura 8.24: Classificazione canali 1D in funzione di ampiezza e ritardo

Si nota che:

- In questo caso il comportamento è abbastanza uniforme nei rii considerati, in quanto tutti presentano deboli variazioni di ritardo di fase, seppur accompagnate da variazioni opposte dei valori delle velocità;
- Anche in questo caso si ipotizza che il diverso segno nelle variazioni di velocità sia dovuto alla differente posizione dei canali.
In particolare il diverso comportamento dei canali 7 - 8 - 9 A sembra derivare dall'incontro dei deflussi provenienti dalle due estremità del Canal Grande in prossimità del loro punto di imbocco. Lo stesso effetto ma nel verso opposto si registra durante le fasi di deflusso, in cui le portate defluiscono da questo punto verso entrambe le estremità del Canal Grande;
- Le variazioni non sembrano essere legate alle caratteristiche geometriche dei rii, in quanto tra loro tutti molto simili.

8.4.4 Sestriere San Polo

Per lo studio del sestriere di San Polo, come riportato in fig. 8.25, sono stati considerati:

- 68 *elementi monodimensionali*, suddivisi in 7 gruppi, per i quali si è ricavato l'andamento nel tempo delle portate passanti nella loro sezione mediana;
- 10 *nodi*, contenuti in un singolo gruppo per i quali si è ricavato l'andamento nel tempo dei tiranti.

La relazione tra livelli, dimensioni dei canali e portate permette di calcolare gli andamenti delle velocità nel tempo.

Il periodo di studio considerato è sempre quello "San Polo - Santa Croce", descritto in sottosezione 4.1.3.

Il confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni relative alle diverse configurazioni geometriche sono riportati graficamente in fig. 8.26.

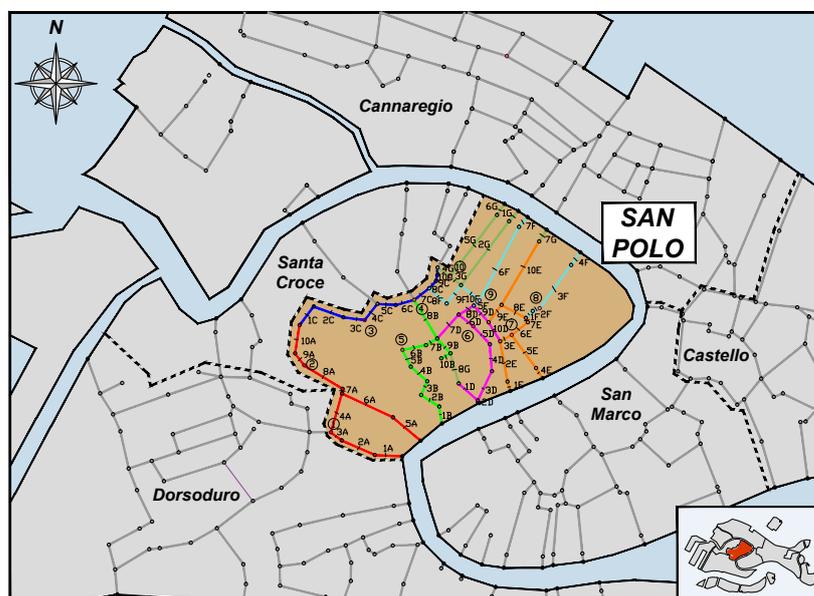


Figura 8.25: Suddivisione dei canali 1D e dei nodi nel sestriere San Polo

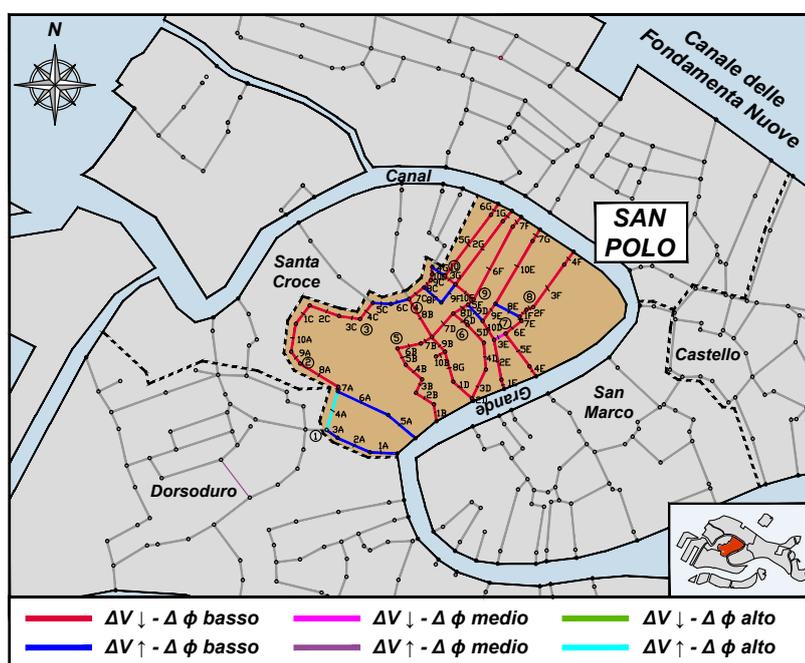


Figura 8.26: Classificazione canali 1D in funzione di ampiezza e ritardo

Si nota che:

- Il comportamento dei canali non è uniforme. Mentre per metà di questi il valore delle velocità aumenta a seguito delle modifiche alle bocche, il comportamento della restante metà è diametralmente opposto;
- Anche per il sestriere di San Polo la posizione dei canali sembra avere una certa importanza sugli effetti idrodinamici indotti. In particolare si nota come l'incontro di più canali su cui le velocità tendono a diminuire porti spesso ad un canale in cui le velocità aumentano. Il forte incremento del ritardo nell'elemento 4A potrebbe ricondursi invece a una relazione tra le differenti variazioni che intercorrono tra i canali ad esso prossimi, mantenendo invariato rispetto a questi il segno della tendenza;
- Anche in questo caso il comportamento sembra essere disgiunto dalle caratteristiche geometriche di larghezza e profondità dei rii, in quanto per canali con la stessa conformazione si ottengono valori opposti delle variazioni.

8.4.5 Sestriere San Marco

Per lo studio del sestriere di San Marco, come riportato in fig. 8.27, sono stati considerati:

- *68 elementi monodimensionali*, suddivisi in 7 gruppi, per i quali si è ricavato l'andamento nel tempo delle portate passanti nella loro sezione mediana;
- *15 nodi*, suddivisi in 2 gruppi, per i quali si è ricavato l'andamento nel tempo dei tiranti.

La relazione tra livelli, dimensioni dei canali e portate permette di calcolare gli andamenti delle velocità nel tempo.

Il periodo di studio considerato è sempre quello "San Polo - Santa Croce", descritto in sottosezione 4.1.3.

Il confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni relative alle diverse configurazioni geometriche sono riportati graficamente in fig. 8.28.

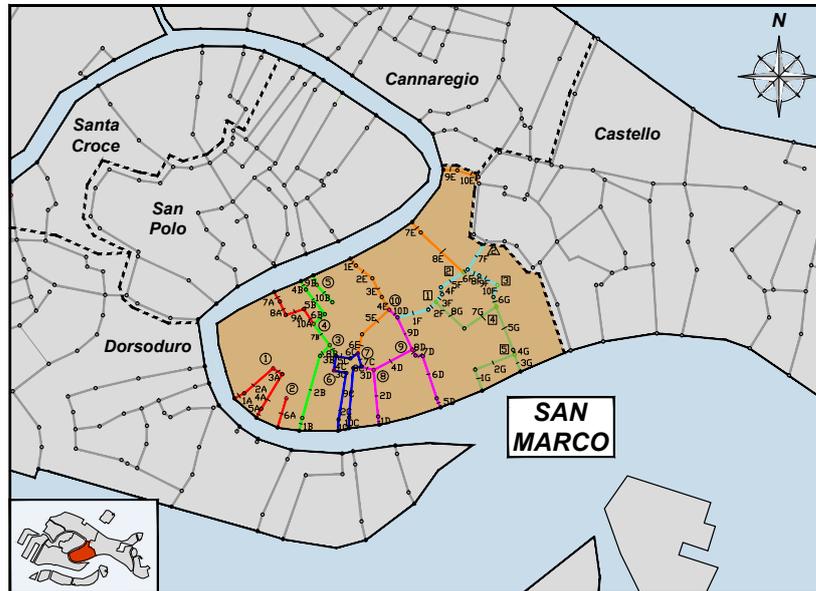


Figura 8.27: Suddivisione dei canali 1D e dei nodi nel sestriere San Marco

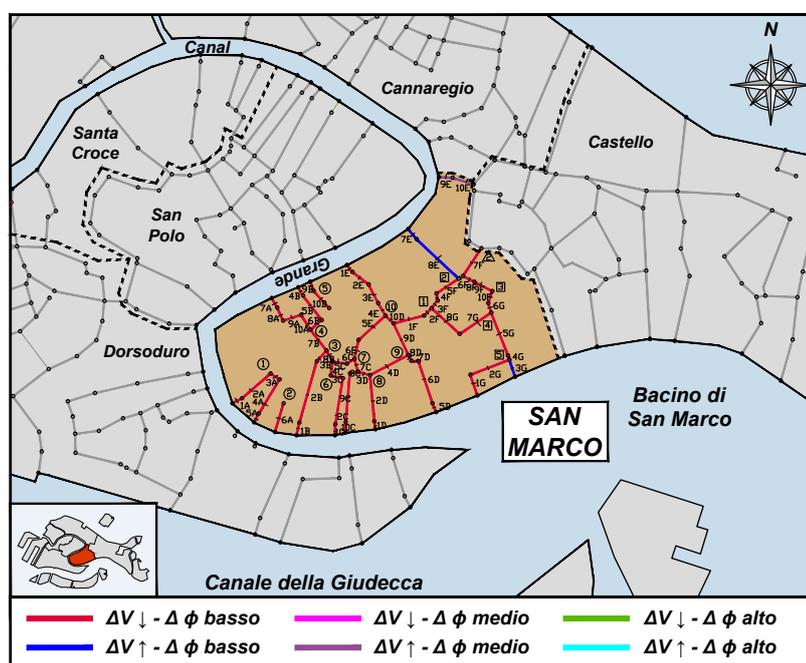


Figura 8.28: Classificazione canali 1D in funzione di ampiezza e ritardo

Si nota che:

- In questo caso il comportamento è quasi completamente uniforme per tutti i canali del sestriere, per i quali si registra una diminuzione dei valori delle velocità accompagnata da una debole variazione del ritardo di fase. Questo ad eccezione dei canali 7 - 8 - 9 - 10 E, per i quali i valori delle velocità aumentano, e i ritardi di fase sono di natura debole e media;
- La posizione dei singoli canali sembra non essere fondamentale per la valutazione degli effetti sul loro comportamento idrodinamico. In realtà il loro posizionamento tra l'imboccatura Sud del Canal Grande e il suo tratto iniziale, dove le variazioni dovute al deflusso sono ancora deboli, sembra essere la causa della loro uniformità di comportamento;
- Essendo il comportamento uniforme se ne deduce che l'effetto delle caratteristiche geometriche sia pressoché nullo.

8.4.6 Sestriere Dorsoduro

Per lo studio del sestriere di Dorsoduro, come riportato in fig. 8.29, sono stati considerati:

- 92 *elementi monodimensionali*, suddivisi in 10 gruppi, per i quali si è ricavato l'andamento nel tempo delle portate passanti nella loro sezione mediana;
- 19 *nodi*, suddivisi in 2 gruppi, per i quali si è ricavato l'andamento nel tempo dei tiranti.

Dalla relazione tra livelli, dimensioni dei canali e portate possono calcolarsi gli andamenti delle velocità nel tempo.

Il periodo di studio considerato è sempre quello "San Polo - Santa Croce", descritto in sottosezione 4.1.3.

Il confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni relative alle diverse configurazioni geometriche sono riportati graficamente in fig. 8.30.

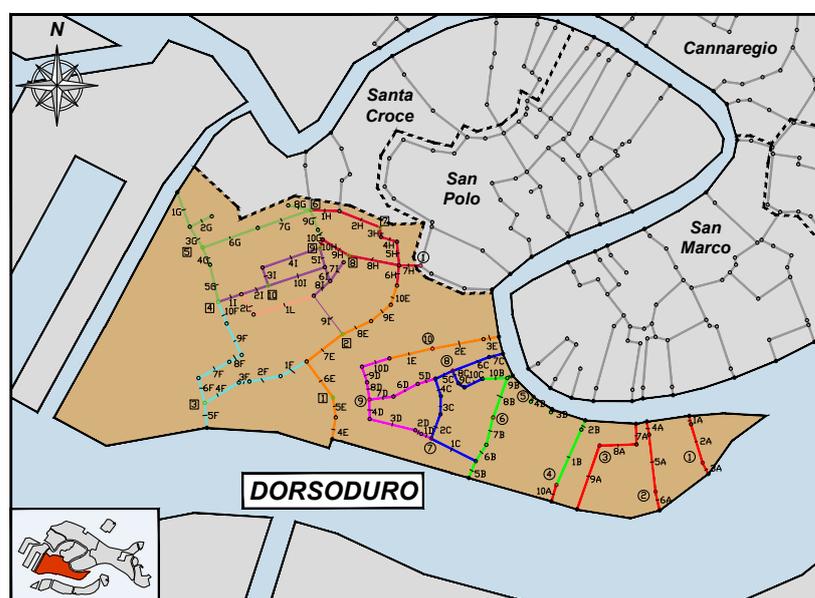


Figura 8.29: Suddivisione dei canali 1D e dei nodi nel sestriere Dorsoduro

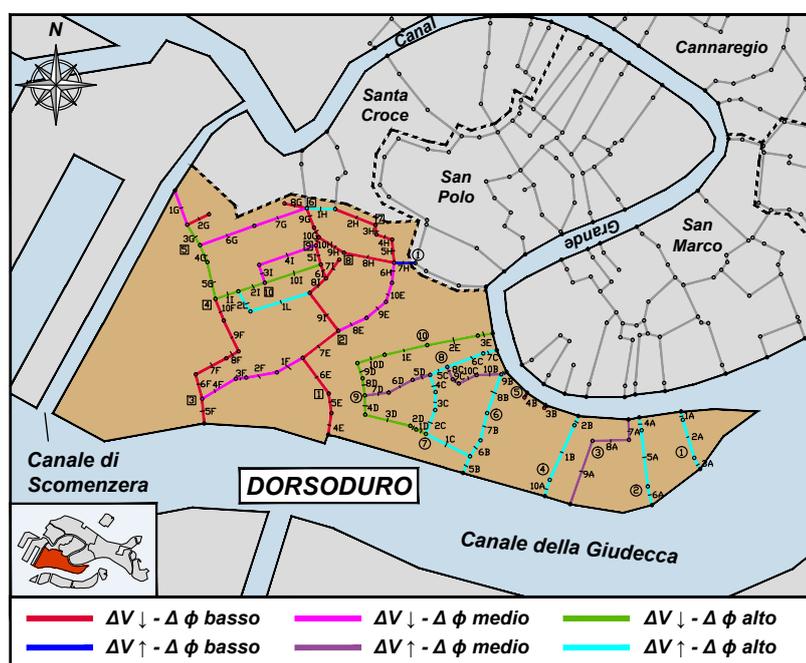


Figura 8.30: Classificazione canali 1D in funzione di ampiezza e ritardo

Si nota che:

- In quest'ultimo caso l'effetto sui singoli canali sembra essere particolarmente vario, sia in relazione ai valori delle velocità che dei ritardi di fase;
- Ancora una volta, come già visto per il sestriere di Cannaregio, l'effetto indotto dalla posizione dei canali sembra non essere trascurabile, in quanto il comportamento dei rii alimentati dai canali della Giudecca e il primo tratto del Canal Grande sono diversi da quelli alimentati dal secondo tratto del Canal Grande e dal canale di Scomenzera. In questo caso la vicinanza con la fascia del partiacque, e in particolare modo il suo riposizionamento a seguito delle opere del Mo.S.E. sembra avere una certa influenza;
- Anche in quest'ultimo caso l'effetto delle caratteristiche geometriche dei canali sull'andamento delle variazioni di velocità sembra essere alquanto ridotto.

8.4.7 Considerazioni

In merito ai risultati ottenuti per i singoli sestrieri, possono trarsi le seguenti considerazioni:

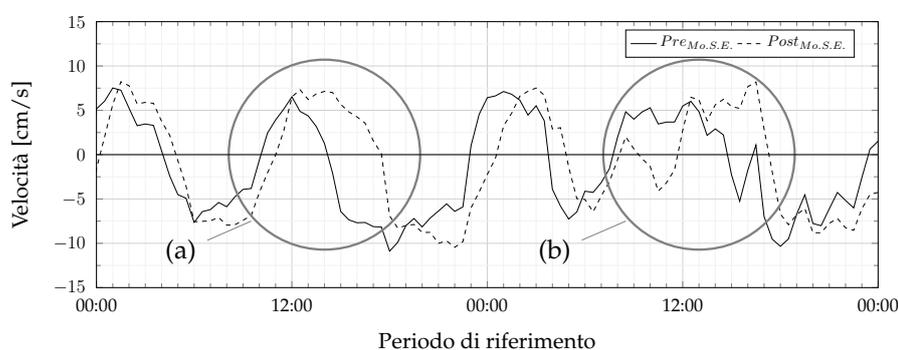
- Il comportamento dei canali appartenenti all'intera rete è molto vario. Si nota in particolare una tendenza ad avere diversi comportamenti non in relazione al sestriere di appartenenza, bensì all'afferenza ai diversi canali maggiori che circondano e intersecano la rete dei canali minori.

In particolare:

- I rii alimentati dal *Canale delle Fondamenta Nuove* e dal *Canal Grande* sono per lo più interessati da un aumento delle velocità, con bassi effetti sul ritardo;
 - I rii alimentati dal *Canale delle Fondamenta Nove* e dal *Bacino di San Marco* sono interessati da una diminuzione della velocità, con bassi valori di ritardo;
 - I rii alimentati dal *Canale di San Marco* e la zona compresa tra il *Canale delle Navi* e il *Bacino dell'Arsenale*, come anche i rii alimentati dal *Canale di Cannaregio* sono soggetti ad un incremento delle velocità con forti effetti sul ritardo di fase;
 - I rii alimentati dal *Canale della Giudecca* e il *Canal Grande* e il *Canale di Scomenzera* presentano effetti estremamente vari sia in termini di velocità che di ritardo.
- Gli effetti sui ritardi e sulle variazioni delle velocità sono in alcuni casi compatibili con quanto riscontrato da alcuni abitanti della città. In particolar modo si possono riscontrare due tipi di effetti di interesse:
 - La modifica delle bocche di porto comporta un incremento del ritardo di fase nell'andamento del segnale di velocità all'interno dei rii, accompagnato spesso da variazioni non troppo evidenti delle loro intensità. La traslazione del segnale di velocità comporta un'alterazione della direzione del deflusso anche per periodi superiori a 3 ore (vedi fig. 8.31 (a));
-

- La modifica delle bocche di porto comporta una variazione delle velocità in alcuni momenti, non necessariamente accompagnati da forti ritardi di fase. Questo comporta in alcuni casi l'alterazione del verso delle correnti, per periodi la cui durata varia da onda a onda di marea e dunque dalle precise caratteristiche del segnale considerato (vedi fig. 8.31 (b)).

Figura 8.31: Confronto Velocità - Canale B7 Dorsoduro



Per quanto riguarda i rii della rete, in nessuno si manifesta uno solo di questi effetti, bensì sempre una loro combinazione. Mentre per i canali di Castello è preponderante il secondo tipo di comportamento, per i canali degli altri sestrieri è invece di maggior peso il primo.

I rii a cui ci si riferisce sono quelli segnati in *Ciano* e *Verde* in fig. 8.32, oltre che nelle figure rappresentanti i singoli sestrieri;

- Le caratteristiche geometriche dei canali sembrano avere un ruolo secondario nella modifica dell'idrodinamica interna alla rete dei rii. Tale considerazione, comune in tutti i sestrieri, è avvalorata dal fatto che per rii molto simili, sono state osservate variazioni molto diverse.

La schematizzazione grafica del comportamento dell'intera rete dei rii di Venezia è riportata in fig. 8.32.

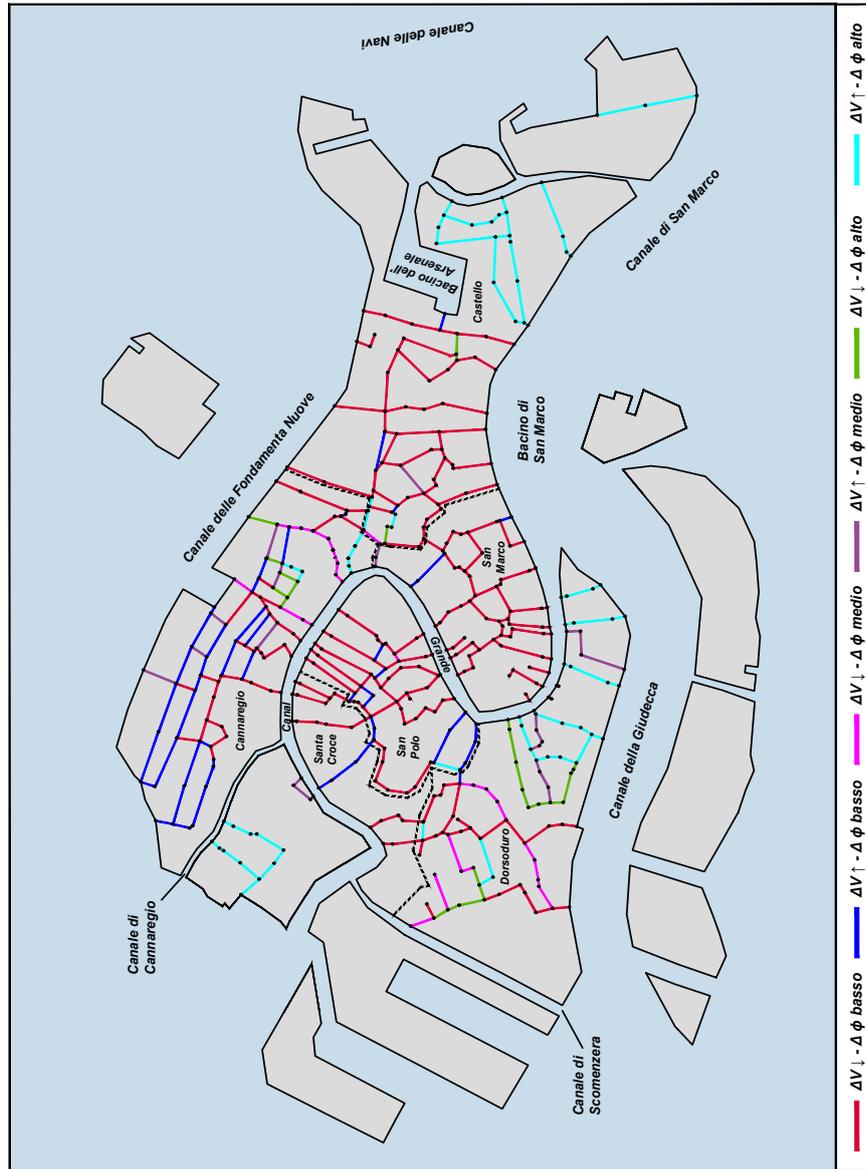


Figura 8.32: Variazione del comportamento idrodinamico dell'intera rete dei canali di Venezia

8.4.8 Intersezione Canal Grande - Canale di Cannaregio

Un punto di notevole interesse per la valutazione degli effetti indotti sui deflussi dalle modifiche alle bocche di porto è il punto di intersezione tra il Canale di Cannaregio e il Canal Grande.

Recenti misure correntometriche (riportate in Matticchio et al., 2017) mostrano che, a differenza di quanto accadeva in passato (Dorigo, 1966), quando la marea è crescente (fase di flusso), il Canale di Cannaregio riceve l'acqua dal Canal Grande sia dalla direzione di Rialto che da quella della Stazione Ferroviaria. Analogamente, quando la marea è calante (riflusso), le misure indicano che il flusso proveniente dal rio di Cannaregio si divide secondo due direzioni, una verso Rialto e una verso la Stazione.

Questo comporta il necessario incremento delle velocità di deflusso nel canale di Cannaregio e di conseguenza in tutti i canali ad esso collegati.

La ragione di tale comportamento sembrerebbe essere dovuta proprio alla presenza delle nuove opere alle bocche di porto.

L'impiego del modello matematico nelle due configurazioni Ante e Post Mo.S.E. sembra smentire tale supposizione.

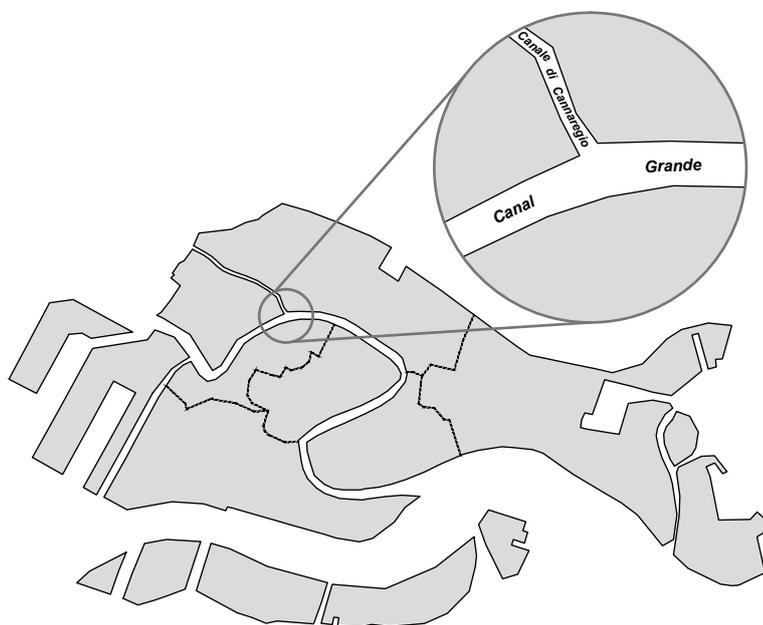


Figura 8.33: Ubicazione del punto di incontro tra il Canal Grande e il Canale di Cannaregio

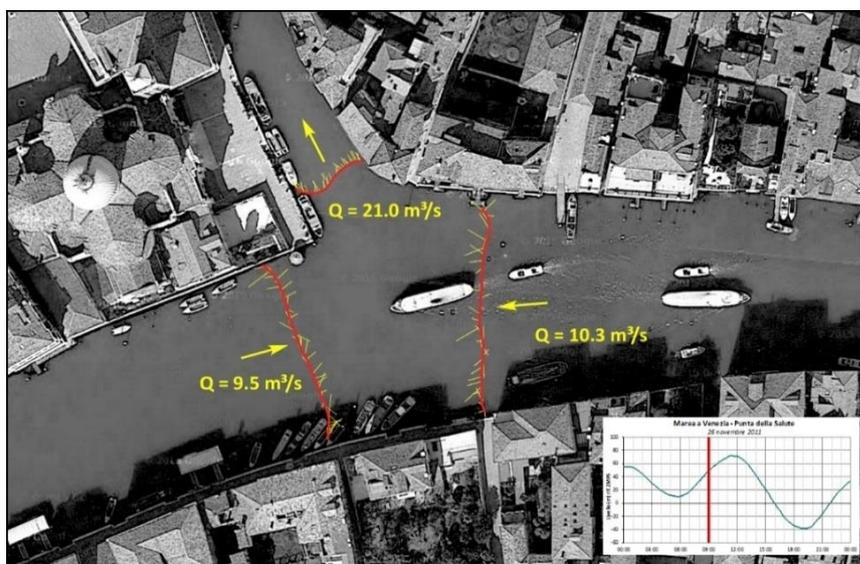


Figura 8.34: Misure correntometriche all'intersezione tra il Canal Grande e il Canale di Cannaregio effettuata il 26/11/2011 durante una marea crescente (tra le 8.57 e le 9.06). Nelle tre sezioni le misure non sono simultanee per cui la continuità non è rigorosamente rispettata (dati forniti dall'Ing. P. Peretti).

Prendendo in considerazione il periodo di studio in sottosezione 4.1.3, in quanto abbastanza simile a quello in cui sono stati svolti i rilievi, si nota come l'effetto di separazione e congiungimento delle correnti nelle rispettive fasi di flusso e riflusso da e verso il Canale di Cannaregio sia presente in entrambe le configurazioni, solo nei momenti successivi a quelli di massima crescita e decrescita delle fasi di marea, dove la prossimità dell'inversione del gradiente idraulico tra la Laguna e il mare porta alla variazione del comportamento della corrente nel tratto di Canal Grande rivolto verso la Stazione Ferroviaria, dovuto al fatto che l'effetto della variazione dell'onda di marea impiega minor tempo a raggiungere l'intersezione di studio passando per il Canale della Giudecca che percorrendo l'intero Canal Grande. Il deflusso si uniforma poi a quello del primo tratto del Canal Grande.

Considerando attendibili le valutazioni svolte sulla base dei rilievi di Dorigo, non è dunque possibile considerare le opere alle bocche come la causa scatenate di tali variazioni, la cui formazione è forse da attribuire ad altre modifiche apportate al territorio lagunare nella seconda metà del XX secolo.

8.5 Modifica dei partiacque

Si ricorda come con il termine *partiacque* ci si riferisca alla "linea di una laguna dove vengono a contatto i flussi di acque marine provenienti da parti diverse." (Enciclopedia Treccani)

Nel nostro caso in particolare non è possibile riferirsi ad una *linea* bensì ad una *fascia*, in cui i flussi incontrandosi riducono la loro velocità fino ad annullarla, segnando il punto di separazione dei sottobacini afferenti alle tre bocche di porto della laguna: rispettivamente Lido, Malamocco e Chioggia. Una modifica delle caratteristiche geometriche e di conseguenza del comportamento idraulico delle bocche di porto comporta dunque delle ripercussioni sui bacini di cui queste sono le sezioni di chiusura.

L'analisi di tali variazioni viene presentata in questa sezione, in cui verranno analizzate le posizioni delle fasce partiacque nei quattro periodi di rilievo dei dati di velocità nei canali della città, valutando l'entità delle loro traslazioni in funzione alle modifiche apportate alle bocche per l'installazione dei manufatti del Mo.S.E.. L'analisi prevede lo studio nelle due fasi della marea, in relazione a diversi valori delle forzanti meteorologiche ed idrauliche presenti nei diversi periodi di simulazione.

Tale valutazione sarà svolta dal punto di vista grafico con l'ausilio del software *Incidenze*, sviluppato dalla *Ipros Ingegneria Ambientale S.r.l.*. Attraverso la lettura dei risultati ottenuti come output dalle simulazioni, il programma restituisce in forma grafica la direzione e l'intensità delle velocità dei deflussi nelle maglie della griglia computazionale, permettendo l'individuazione del partiacque nella posizione di incontro dei flussi provenienti dalle bocche in fase di flusso o diretti verso le bocche in fase di riflusso. L'involuppo delle linee individuate per le diverse fasi di marea, simulate nei singoli periodi di studio, restituisce la fascia di interesse del partiacque, riportata graficamente nelle sezioni a seguire.

Lo studio delle variazioni dei partiacque nei diversi periodi è utile a verificare l'uniformità del modo in cui l'idrodinamica lagunare si modifica in relazione alle diverse condizioni al contorno applicate, attribuendo alle modifiche alle bocche di porto, unica variazione della geometria che caratterizza le diverse simulazioni, la paternità dello spostamento dei partiacque.

8.5.1 Periodo rilievi San Polo - Santa Croce

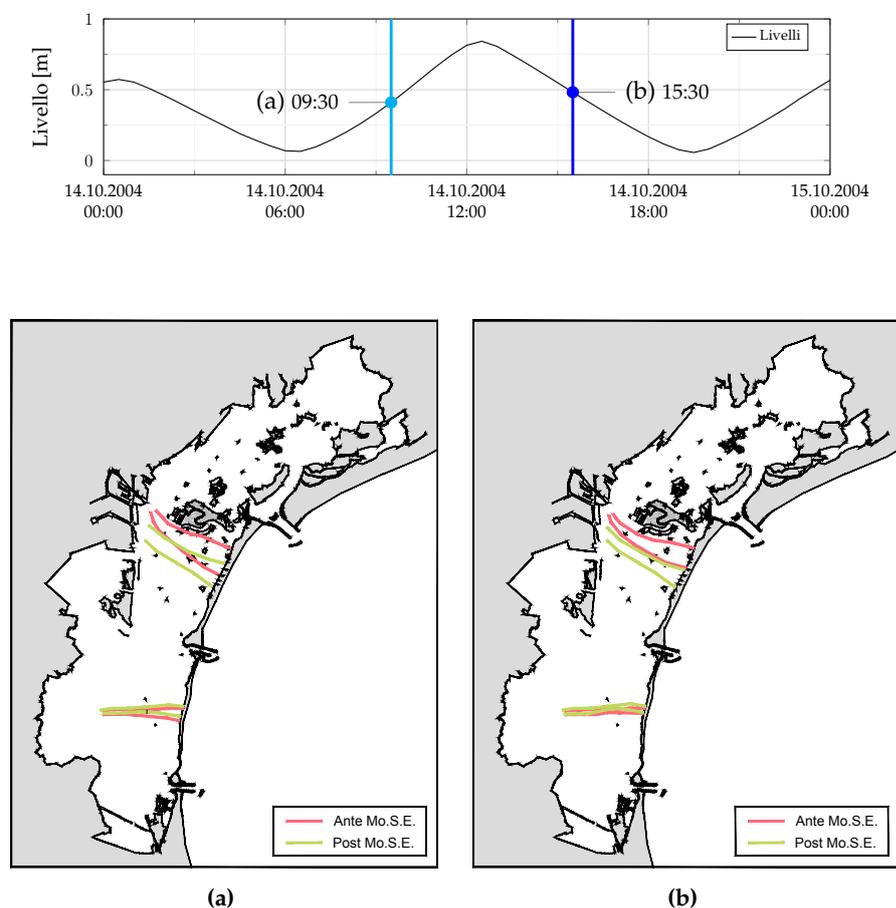


Figura 8.35: Spostamento della *linea del partiacque* tra le configurazioni Ante e Post Mo.S.E.. (a): fase di flusso; (b): fase di riflusso.

La fascia del partiacque Lido-Malamocco risulta nettamente traslata verso la parte centrale della laguna a seguito delle modifiche alle bocche, sia nella fase di flusso che di riflusso. Lo spostamento è mediamente pari a circa 1.50 km.

La fascia del partiacque Malamocco-Chioggia risulta anch'essa traslata verso il centro, ma in modo molto meno evidente, soprattutto nella fase di flusso. Lo spostamento è mediamente pari a circa 400 m.

Le loro posizioni sono all'incirca comuni nelle due fasi.

Il bacino di Malamocco subisce un netto restringimento.

8.5.2 Periodo rilievi Dorsoduro

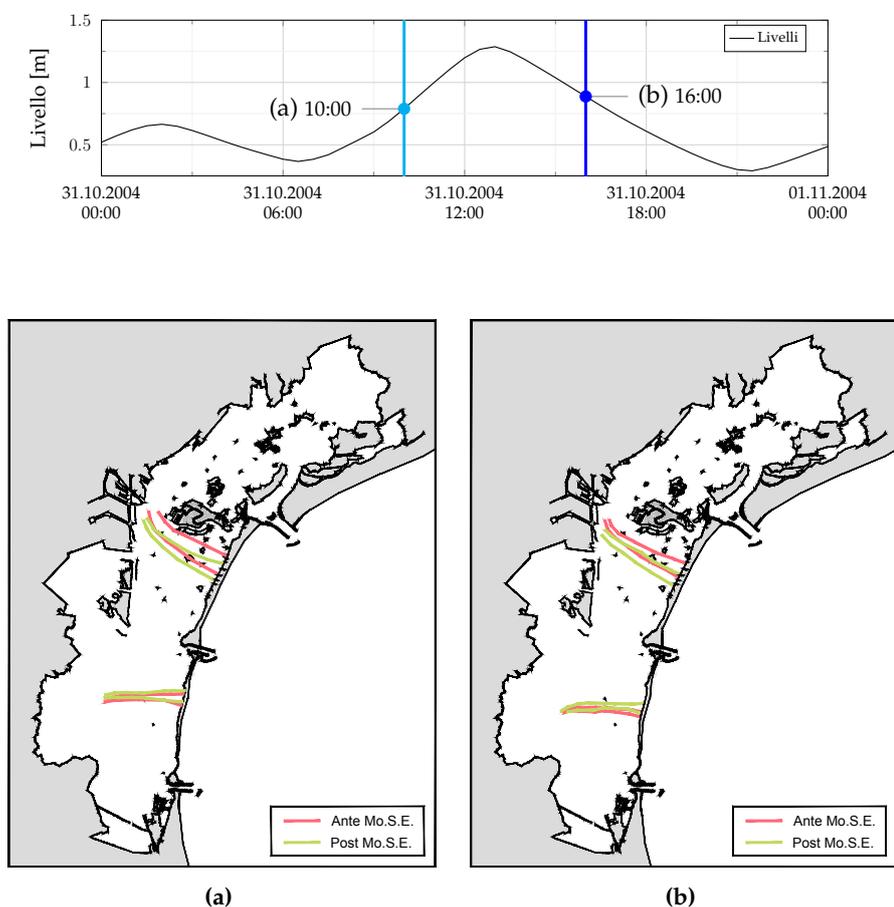


Figura 8.36: Spostamento della *linea del partiacque* tra le configurazioni Ante e Post Mo.S.E.. (a): fase di flusso; (b): fase di riflusso.

La fascia del partiacque Lido-Malamocco risulta traslata verso la bocca centrale nelle fasi di flusso e riflusso, in modo meno marcato rispetto al caso precedente. Lo spostamento è mediamente pari a circa 900 m.

La fascia del partiacque Malamocco-Chioggia risulta ancora traslata verso il centro della laguna, in modo più evidente nella fase di riflusso. Lo spostamento è mediamente pari a circa 100 ÷ 200 m.

La posizione del partiacque tra Chioggia e Malamocco è più traslata verso il centro della laguna nelle fasi di flusso. Il contrario accade per il partiacque tra Malamocco e Lido.

Si conferma dunque il restringimento del bacino di Malamocco.

8.5.3 Periodo rilievi Cannaregio

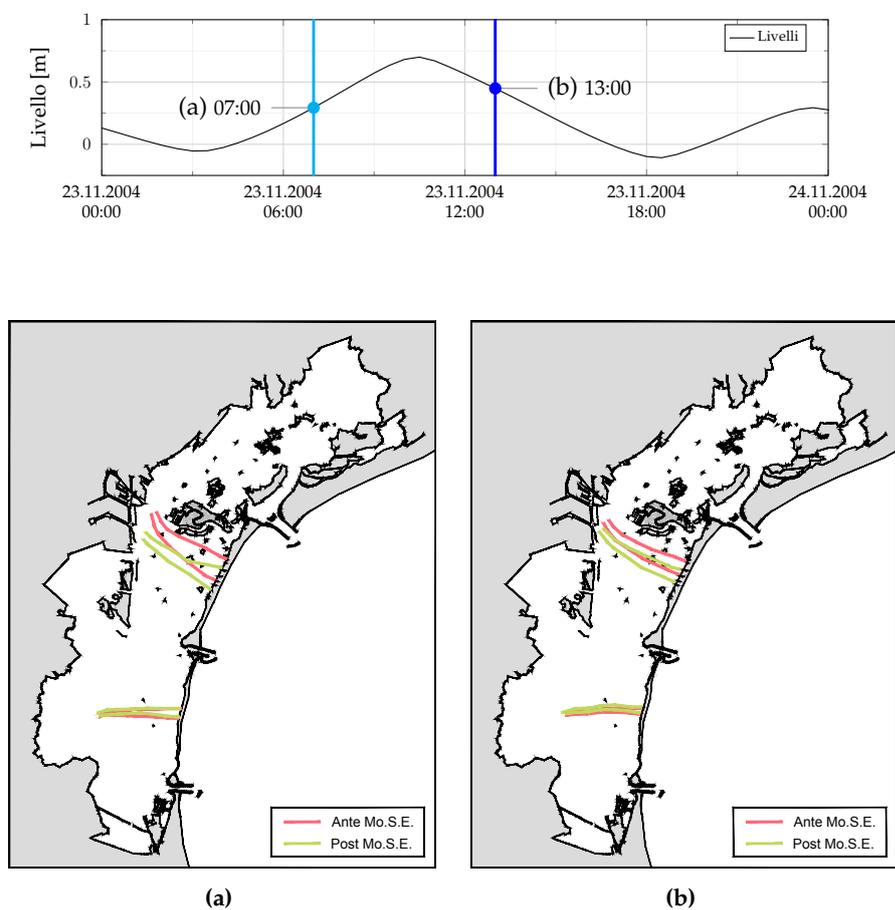


Figura 8.37: Spostamento della *linea del partiacque* tra le configurazioni Ante e Post Mo.S.E.. (a): fase di flusso; (b): fase di riflusso.

La fascia del partiacque Lido-Malamocco risulta traslata verso la bocca centrale nelle fasi di flusso e riflusso. L'effetto è molto evidente in prossimità del porto di Marghera. Lo spostamento è mediamente pari a circa 1.30 km.

La fascia del partiacque Malamocco-Chioggia risulta ancora traslata verso il centro. Nessuna delle due fasi sembra primeggiare sull'altra. Lo spostamento è mediamente pari a circa 200 m.

Si conferma il restringimento del bacino di Malamocco.

8.5.4 Periodo rilievi Castello

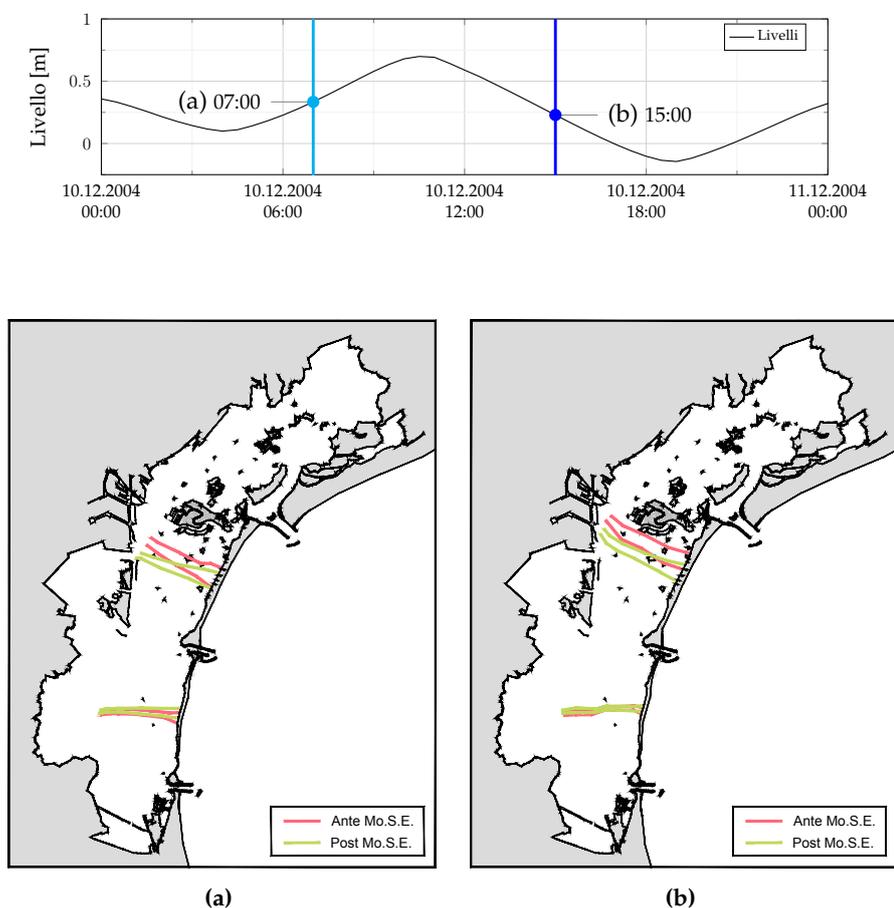


Figura 8.38: Spostamento della *linea del partiacque* tra le configurazioni Ante e Post Mo.S.E.. (a): fase di flusso; (b): fase di riflusso.

La fascia del partiacque Lido-Malamocco risulta traslata verso la bocca centrale nelle fasi di flusso e riflusso, con una netta differenza Est-Ovest nella fase di flusso. Lo spostamento è mediamente pari a circa 1.20 km.

Anche la fascia del partiacque Malamocco-Chioggia risulta ancora traslata verso il centro alla laguna. Il maggiore effetto si osserva in fase di flusso. Lo spostamento è mediamente pari a circa 100 ÷ 200 m.

La posizione del partiacque Nord è molto diversa nelle fasi di flusso e riflusso. Tale differenza è meno marcata in quello a Sud.

Si conferma nuovamente il restringimento del bacino di Malamocco.

8.5.5 Traslazione media della fascia partiacque

Sovrapponendo tutti gli inviluppi ottenuti per i singoli periodi di simulazione considerati, sia per le fasi di flusso che di riflusso, si ottiene lo spostamento medio della fascia di partiacque in seguito alle modifiche alle bocche di porto dovute al progetto Mo.S.E..

L'ammontare dell'inviluppo complessivo è riportato in fig. 8.39.

Dalla sua analisi si conferma la maggiore traslazione che caratterizza il partiacque Malamocco - Lido, spostatosi mediamente di circa 1 km, rispetto al partiacque Chioggia - Malamocco, la cui traslazione è in media di circa 100 m.

Essendo la traslazione di entrambi rivolta verso il centro della laguna, si conferma dunque anche il restringimento del bacino di Malamocco rispetto ai limitrofi bacini di Lido e Chioggia.

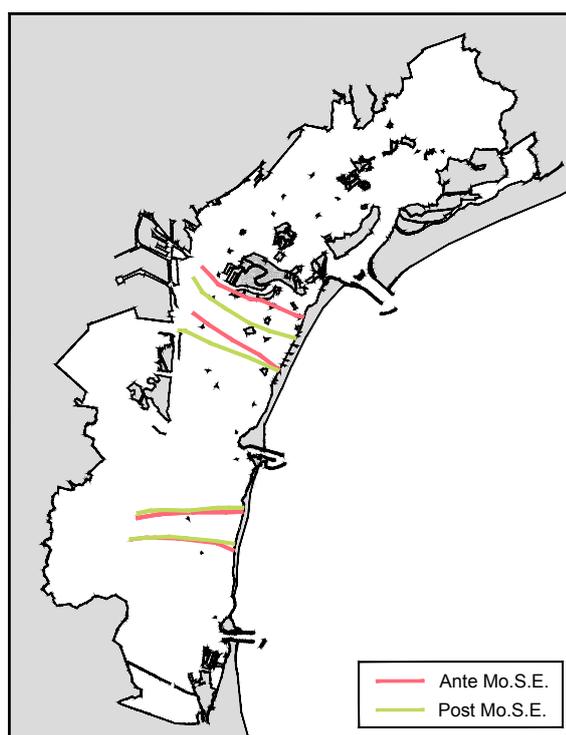


Figura 8.39: Spostamento medio della fascia del partiacque tra le configurazioni Ante e Post Mo.S.E., ottenuta come inviluppo delle fasce ottenute per i vari periodi di studio.

8.5.6 Considerazioni

In merito ai risultati ottenuti sulla variazione delle posizioni delle fasce di partiacque, riportati nelle precedenti sezioni, possono trarsi le seguenti considerazioni:

- Lo spostamento della fascia partiacque Malamocco - Lido (M - L) è sempre maggiore rispetto a quella della fascia Chioggia - Malamocco (C - M).

La ragione della preponderante variazione del partiacque M - L sta nella maggiore dissipazione indotta dalla bocca di Malamocco nei confronti dei flussi entranti e uscenti dalla laguna rispetto alla bocca di Lido, provocando una maggiore contrazione del suo bacino rispetto a quello limitrofo, che tende dunque ad espandere occupandone parte della superficie, spostando di conseguenza la loro linea di separazione.

Essendo gli effetti dissipativi indotti dalla bocca di Chioggia paragonabili a quelli di Malamocco, seppur più contenuti, l'effetto sulla traslazione del partiacque C - M tende ad essere meno marcato.

Ulteriore elemento da considerare è la concomitanza del partiacque M - L con i *Canali dei Petroli, di S. Spirito e delle Scoasse*, nei quali gli effetti indotti dalle modifiche alle bocche tendono ad essere più marcati, viste le loro notevoli dimensioni e dunque la minor presenza di perdite di carico.

La maggiore staticità della fascia dei partiacque C - M sembra essere attribuibile alla presenza del *Canale dei Sette Morti* sul quale tale fascia sembra stazionare in modo marcato, subendo traslazioni generalmente ridotte.

Per la *fascia Lido - Malamocco* lo spostamento è mediamente pari a 1.20 km. Per la *fascia Chioggia - Malamocco* lo spostamento è mediamente pari a 300 m;

- Si osserva come nel passaggio dalla situazione Ante a quella Post Mo.S.E., la fascia M - L oltre a subire una traslazione sia soggetta anche ad un restringimento. Questo è forse dovuto al minore effetto della vicina città di Venezia, il cui effetto smorzante viene meno

all'allontanarsi del partiacque, diminuendo dunque la sua zona di interesse;

- La posizione della fascia partiacque non subisce forti modifiche in termini di posizione tra le fasi di flusso e riflusso;
 - La modifica della posizione del partiacque, visto l'equilibrio richiesto dal maggior richiamo idrico nella zona da esso in precedenza occupata, sembra essere responsabile dell'aumento delle velocità nella parte sud della città di Venezia e ad una loro diminuzione nella parte nord;
 - Il sottobacino di Malamocco risulta ridotto a favore dei sottobacini limitrofi di Lido e Chioggia a causa del maggiore aumento delle perdite di carico rispetto alle altre bocche, dovute alle modifiche apportate per l'installazione delle opere del Mo.S.E.. Tale risultato è in accordo con quanto ottenuto da precedenti Autori (Ziggiotto, 2013; Maticchio et al., 2017), secondo cui le modifiche di maggiore impatto sono localizzate nella bocca centrale.
-

Conclusioni

Scopo ultimo di questa tesi è la descrizione degli effetti prodotti dalla costruzione delle opere fisse alle bocche di porto, nell'ambito del progetto Mo.S.E., sull'idrodinamica interna alla laguna, con particolare riguardo alla rete dei rii della città di Venezia.

Al fine di raggiungere la piena consapevolezza delle modalità e delle entità con cui tali modifiche si presentano nella rete dei rii, e allo scopo di verificare la validità degli studi svolti per mezzo di un confronto diretto con i risultati presenti in letteratura, l'analisi è stata condotta considerando vari aspetti dell'idrodinamica lagunare.

L'impiego di un modello misto uni-bidimensionale è necessario per la corretta rappresentazione di tutti gli aspetti idrodinamici considerati, in quanto permette di riprodurre la complessa rete dei canali cittadini, schematizzati come elementi 1D, unitamente all'intera laguna, schematizzata con elementi 2D. Necessario è anche l'inserimento del vento nella modellazione numerica, in quanto forzante di non poco conto nel regime idrodinamico lagunare.

A valle di un articolato processo di calibrazione, il modello numerico predisposto ha dimostrato di essere in grado di riprodurre in modo più che soddisfacente l'idrodinamica lagunare, con risultati oltre le aspettative per quanto riguarda la simulazione delle velocità nei canali della città, per i quali l'attribuzione del coefficiente di scabrezza secondo Strickler è avvenuta per zone omogenee all'interno del territorio cittadino.

I risultati del calcolo hanno evidenziato l'incremento della resistenza alle bocche di porto, dovuto al loro restringimento e all'alterazione delle caratteristiche del fondale. Tale alterazione comporta una riduzione delle portate scambiate tra la laguna e il mare aperto, pari a circa il 10% nelle

fasi di flusso e riflusso. Si è osservato, in particolare, che la bocca che ha subito il maggiore incremento della resistenza a causa delle modificazioni geometriche e batimetriche è stata la bocca di Malamocco.

Quest'ultimo aspetto si traduce in una alterazione degli equilibri presenti in laguna.

Il restringimento del bacino di afferenza alla bocca di Malamocco, dovuto allo spostamento delle fasce partiacque verso la parte centrale della laguna, facilitata nella parte settentrionale dalla presenza dei grandi canali navigabili, è forse la più evidente di queste variazioni.

Non meno importante è la generale riduzione delle velocità di flusso e del valore dei livelli nell'intera superficie lagunare, entrambe accompagnate da un aumento del ritardo di fase con cui si presentano. Tali effetti sono ancora una volta di maggiore entità per il bacino governato dalla bocca di Malamocco.

L'alterazione delle velocità di deflusso all'interno della rete dei canali della città di Venezia è infine una conseguenza di quanto accade nella laguna che la circonda e la alimenta. L'intero funzionamento dei canali, governato dai piccoli gradienti di livello presenti tra le varie zone della città, e in particolar modo nei grandi canali che alimentano la rete secondaria dei rii, risulta infatti interessato dalle modifiche dell'idrodinamica esterna. Ciò che se ne ottiene è una alterazione delle velocità nei rii, in alcuni casi aumentate e in altri ridotte, ma sempre accompagnate da un incremento del loro ritardo di fase. L'alterazione del verso di percorrenza della corrente, riscontrato da precedenti autori, come anche dagli stessi abitanti della città, è infine verificato per alcuni canali della rete, dove l'interazione tra il forte aumento del ritardo di fase e l'alterazione delle intensità delle correnti, comporta in alcuni casi una variazione delle direzioni dei flussi, pienamente apprezzabili anche in assenza di un'apposita strumentazione, per periodi che in genere non superano le 4 ore.

L'impiego di un numero esiguo di rii considerati per lo svolgimento dei rilievi correntometrici nel periodo precedente l'ultimazione delle opere alle bocche, utili alla taratura del modello e alla sua successiva verifica, ha condizionato, seppur in modo non eccessivo, il raggiungimento dell'ottimo nelle simulazioni svolte. Una maggiore disponibilità di dati avrebbe sicu-

mente garantito un miglioramento dei risultati ottenuti, la cui validità resta comunque comprovata.

La stessa considerazione risulta valida in relazione alla mancanza di rilievi correntometrici nel periodo successivo all'ultimazione delle opere fisse del Mo.S.E., per cui la verifica degli effetti sul comportamento dei rii è stata svolta solamente basandosi sui valori calcolati da modello che è stato verificato, nella configurazione attuale, esclusivamente sulla base dei dati di livello registrati in laguna.

Allo scopo di poter migliorare e verificare i risultati ottenuti, si auspica lo svolgimento di future campagne di rilievo correntometrico nella rete dei rii della città, con particolare riferimento ai 12 utilizzati nella presente tesi, senza però escludere la possibilità di svolgere una campagna a più ampio raggio, magari guidata nella scelta dei siti più opportuni, dove effettuare le misure, proprio dai risultati del modello. Si ritiene da ultimo opportuno sottolineare che le variazioni oggettivamente riscontrabili e riscontrate dell'idrodinamica interna dei rii veneziani possa in parte essere imputabile ad altre modificazioni del contesto lagunare (e.g. costruzione di barene artificiali a sud dell'Isola di San Michele, interrimento e/o scavo di alcuni rii soggetti a manutenzione ecc.).

Il vantaggio dell'approccio seguito nel presente lavoro di tesi, in cui l'unica modifica che caratterizza le due configurazioni analizzate è solo la presenza delle opere alle bocche, è proprio quello di essere riusciti a valutare l'effetto ascrivibile alle opere stesse che, come visto, risulta decisamente apprezzabile.

Bibliografia

- Comune Venezia. URL: <http://www.comune.venezia.it/>.
- Enciclopedia Treccani. URL: <http://www.treccani.it/vocabolario/>.
- GeoExplorer. URL: <http://cigno.atlantedellalaguna.it/maps/18/view>.
- Geoportale Nazionale. URL: <http://www.pcn.minambiente.it/GN/>.
- ISPRA. URL: <http://www.venezia.isprambiente.it/la-marea>.
- Carniello, L. et al. (2011). «Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins». In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 92.2, pp. 263–276.
- Carrera, F. et al. (2012). «Streamlining Canal Hydrodynamic Measurements in Venice».
- Coraci, E. et al. (2007). «Hydrodynamic and sediment transport modelling in the canals of Venice (Italy)». In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 75.1, pp. 250–260.
- D’Alpaos, L. (2010). *Fatti e misfatti di idraulica lagunare. La laguna di Venezia dalla diversione dei fiumi alle nuove opere delle bocche di porto*. IVSLA.
- Defina, A. (2000). «Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas». In: *Water resources research* 36.11, pp. 3251–3264.
- Defina, A. et al. (1995). «A coupled 2D and 1D finite element model for simulating tidal flow in the Venice channel network». In: *Proceedings of the International Conference on Finite Elements in Fluids - New Trends and applications*.
- Dorigo, L. (1966). «Rilievi contemporanei di velocità della corrente di marea nei canali nella Giudecca, Fondamenta Nuove, Canal Grande e in alcuni rii interni della città’». In: *Atti IVSLA*.

- Krause, P. et al. (2005). «Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment». In: *Advances in geosciences* 5, pp. 89–97.
- Martignon, C. (2013). «Impatto della chiusura delle bocche di porto sui livelli di marea all'interno della laguna di Venezia in presenza di vento intenso».
- Matteotti, G. (2014). *Lineamenti di costruzioni marittime*. S.G.E.
- Matticchio, B. et al. (2017). «Recenti variazioni della propagazione della marea in Laguna di Venezia: effetti indotti dalle opere fisse alle Bocche di Porto». In: *Atti IVSLA Tomo xxxxxx (2016-2017)*, Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali.
- Rinaldo, A. et al. (2006). «Note su alcune valutazioni idrologiche rilevanti la salvaguardia di Venezia». In: *Atti IVSLA Tomo CLXV (2006-2007)*, Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali.
- Scortegagna, U. (2008). «La laguna di Venezia: genesi ed evoluzione».
- Umgiesser, G. et al. (2001). «Hydrodynamic and salinity modelling of the Venice channel network with coupled 1-D–2-D mathematical models». In: *Ecological modelling* 138.1, pp. 75–85.
- Ziggiotto, E. (2013). «Sulla propagazione della marea in Laguna di Venezia: effetti indotti dalle opere fisse del Mo.S.E.»
-